JULI 2006 · € 6,90 (D/A)

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

Spektrum DER WISSENSCHAFT

- Katalysatoren zur Abwasserreinigung
- Der Untergang von Ugarit
- Fernste Galaxien
- ESSAY: Für ein Sterben in Würde

www.spektrum.de

PHYSIK

Quantenknoten in der Raumzeit

Mit ihrer Hilfe könnten Quantencomputer leichter realisiert werden

SZENARIEN

Die Kunst der Vorhersage

DIABETES

Medikamente gegen Spätfolgen

ORANG-UTANS

Klüger durch Kultur

D6179E
13,50 sFr/Luxemburg 8,– €
07
4 194058 406900

Reinhard Breuer
Chefredakteur

Vom Sterben in Würde

Liebe Spektrum-Leser,

Das böse Wort vom »Sterbetourismus« wurde häufig bemüht, wenn es darum ging, in der Schweiz oder in den Niederlanden Hilfe für ein »Sterben in Würde« zu erhalten. In Deutschland ist das Thema juristisch weit gehend tabuisiert, obwohl nach Umfragen eine Mehrheit »Sterbehilfe mit mehr Selbstbestimmung« befürwortet. Der Bioethiker Edgar Dahl greift die Debatte jetzt in unserem Essay auf (S. 116).

Dahl, 44 Jahre, von der Universität Gießen hat Philosophie und Biologie studiert und bereits einige heiße Eisen angepackt. So in seiner Doktorarbeit über ethische Probleme bei der Verwendung von Tieren als Organspender für Menschen. Auch hat ihn die Frage beschäftigt, wie sehr Eltern in Deutschland wünschen, das Geschlecht ihrer Kinder zu beeinflussen. Wie Dahl und seine Arbeitsgruppe herausfanden, möchten 94 Prozent der Deutschen jedoch keine vorgeburtliche Geschlechterwahl vornehmen – selbst wenn die Krankenkasse dies zahlen würde.

Zur Sterbehilfe analysiert Dahl die – erstaunlich positiven – Erfahrungen im US-Bundesstaat Oregon, wo seit 1997 der *Death with Dignity Act* in Kraft ist. Auch Ihre Meinung interessiert uns dazu: www.spektrum.de/sterbehilfe.

Ungewöhnliche Probleme verlangen manchmal ungewöhnliche Lösungen. Zu derartigen Problemen zählen etwa Berechnungen, die heutigen Supercomputern noch widerstehen: Kryptografie, Klima, Proteinfaltung. Das sollen künftig einmal Quantencomputer richten. Doch diese Wundermaschinen kranken bisher alle an einem Punkt – kleinste Störungen der Umwelt vernichten durch so genannte Dekohärenz alsbald genau den Quantenzustand, in dem die Rechner ihre atemberaubenden Kalkulationen vollziehen sollen.

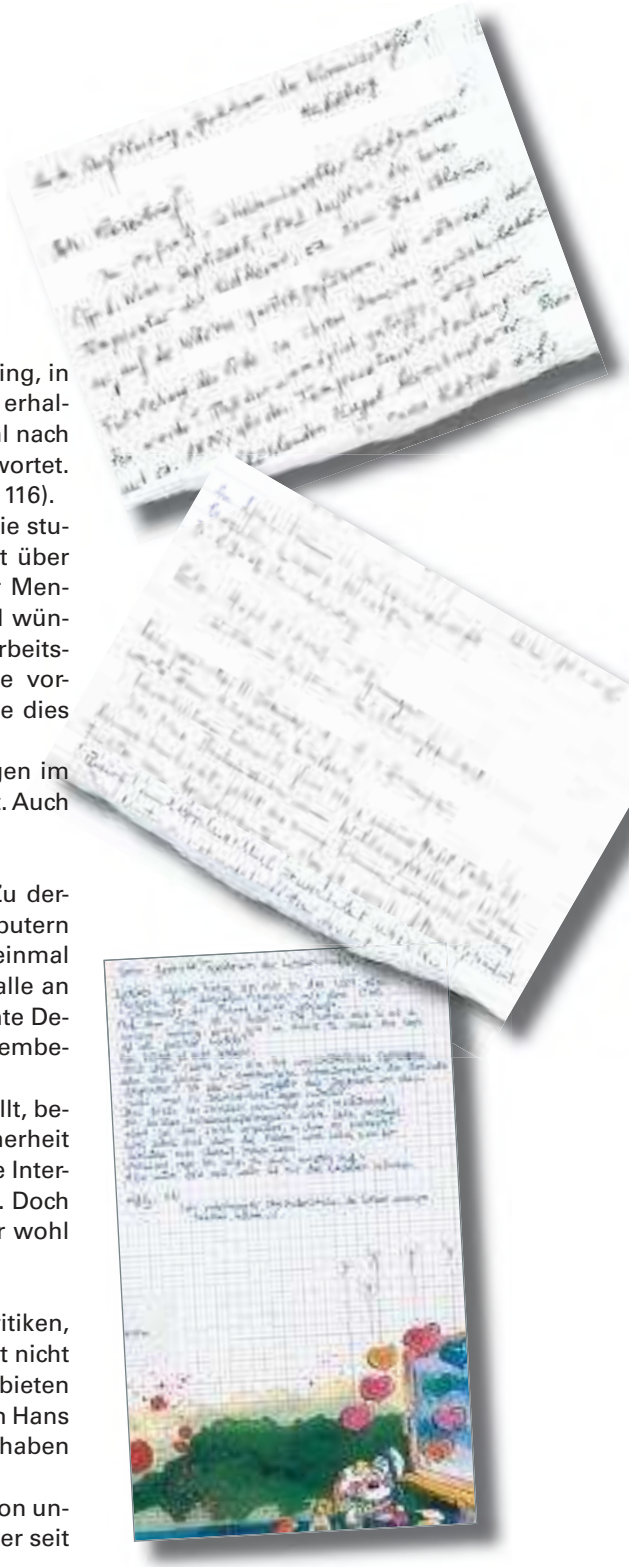
Ob »topologische Quantencomputer«, die unsere Titelgeschichte vorstellt, bereits einen Ausweg aus diesem Dilemma bieten, kann heute keiner mit Sicherheit sagen. Aber sie sind, jedenfalls vom Konzept her, fehlertoleranter. Zufällige Interaktionen mit der Umgebung können sie nicht aus der Rechenbahn werfen. Doch eines scheint auch sicher: Als gewöhnliche PCs werden Quantencomputer wohl niemals auf unseren Büroschreibtischen landen (S. 34).

Ein Wort an alle, die uns immer wieder Leserbriefe schreiben: Ob Nachfragen, Kritiken, Kommentare, Hinweise oder Lob – jeder Brief ist wertvoll für uns. Vielleicht nicht überraschend erhalten wir die meisten Zuschriften zu Themen aus Grenzgebieten der Naturwissenschaft, zuletzt zum Streitgespräch zwischen dem Theologen Hans Küng und dem Kosmologen Gerhard Börner (SdW 4/2006, S. 100). Viele haben sich dazu in unserem Online-Forum geäußert.

Drei Leserbriefe haben wir rechts ausgewählt: von unserem jüngsten, von unserem ältesten (96 Jahre!) sowie von unserem treuesten Briefeschreiber, der seit Jahrzehnten auf fast jedes Heft reagiert.

Herzlich Ihr

Reinhard Breuer



Sie schrieben an uns: Dr. Ing. G. Lochmann, der Älteste (oben), W. J. Fraidling, der Treueste (Mitte), und der anonyme Oberstufenschüler als Jüngster.

INHALT

SPEKTROGRAMM

10 Duell im Hirn · Dünen auf Titan · Gen verleiht Flügel · Flaute im Treibhaus · Urschlange mit zwei Beinen u. a.

13 **Bild des Monats**
Wesen der Tiefe

FORSCHUNG AKTUELL

14 **Nachrichten vom Urknall**
Erkenntnisse aus drei Jahren WMAP

16 **Autismus spiegelt sich im Hirn**
Spiegelneurone bleiben bei autistischen Kinder weit gehend inaktiv

21 **Blechkameraden für die Front**
Erfahrungen aus dem ersten europäischen Wettstreit für Landroboter

23 **Nur ein frommer Wunsch**
Im wissenschaftlichen Test brachte Beten Patienten keinen Nutzen

THEMEN

▶ **26** INTELLIGENZ
Orang-Utans – klüger dank Kultur

▶ **34** TITELTHEMA PHYSIK
Rechnen mit Quantenknoten

▶ **42** ZUCKERKRANKHEIT
Wirkstoffe gegen Diabetesschäden

▶ **52** ASTRONOMIE
Vom Werden der Welteninseln

▶ **64** ARCHÄOLOGIE
Der Untergang von Ugarit

▶ **86** CHEMIE
Katalysatoren für die Reinigung industrieller Abwässer

▶ **94** SZENARIEN
Erfolg bei unsicheren Prognosen

▶ **116** ESSAY
Ein Modell für Sterbehilfe in Deutschland?

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▶ gekennzeichnet; die mit 🔊 markierten Artikel können Sie als Audiodatei im Internet beziehen, siehe: www.spektrum.de/audio

SEITE 26

INTELLIGENZ

Orang-Utans – klug dank Kultur

Je mehr Sozialkontakt die Menschenaffen pflegen, umso ausgeprägter ist ihr Werkzeuggebrauch. Offenbar fördert die Bereitschaft, von anderen zu lernen, die geistige Beweglichkeit

SEITE 42

ZUCKERKRANKHEIT

Neue Medikamente gegen Diabetesfolgen

Schäden an den Blutgefäßen können bei Zuckerkranken zu Erblindung oder Nierenversagen führen und manchmal zu Amputationen zwingen. Künftig sollen Arzneimittel davor schützen

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

SEITE 64

ARCHÄOLOGIE

Der Untergang von Ugarit

Eine Sonnenfinsternis weckte im Königreich Ugarit Ängste vor drohendem Unheil. Tatsächlich ging es wenig später unter

ASTRONOMIE SEITE 52

Lebenswege der Galaxien

Durch die Beobachtung so genannter tiefer Felder schließen Astronomen auf die Evolution der Welteninseln vom Urknall bis heute

TITELTHEMA PHYSIK SEITE 34

Computer mit Quantenknoten

Mit Hilfe bestimmter Teilchen lassen sich so genannte Knotenstränge in der Raumzeit flechten. Eine Maschine, die mit solchen Quantenzöpfen operiert, könnte bisher unmögliche Berechnungen ausführen

SEITE 86

CHEMIE

Künstliche Schadstoffkiller

Eine neue Klasse von Katalysatoren, konstruiert nach dem Vorbild natürlicher Enzyme, kann in industriellen Abwässern hartnäckigste Verunreinigungen zerstören, bevor sie in die Umwelt gelangen

SEITE 94

SZENARIEN

In die Zukunft blicken

Eine neue, flexible Szenariotechnik erlaubt eine konsensfähige Politikberatung auch bei Fragen mit hoher wissenschaftlicher Unsicherheit – wie etwa beim Klimaschutz

JULI 2006

KOMMENTARE

23 **Angemerkt**
Pubertäre Menschheit

24 **Springers Einwürfe**
Was hier steht, ist falsch

WISSENSCHAFT IM ...

50 **Alltag:** Das Düsentriebwerk

84 **Rückblick:** Radio Jupiter · Erschöpfendes Weinen – triumphierendes Lachen · Splitter elektromagnetisch entfernen u. a.

JUNGE WISSENSCHAFT

72 **Bundeswettbewerb Jugend forscht 2006**

REZENSIONEN

102 **Geißeln der Menschheit** von Stefan Winkle
Der Mathe-Instinkt von Keith Devlin
100 000 Jahre Sex von Vincent T. van Vilsteren und Rainer-Maria Weiss (Hg.)
Der Versuch, die Seele zu wiegen von Len Fisher
Fußball – Wissenschaft mit Kick von John Wesson

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

108 **Mitten im WM-Wahn: verallgemeinerte Fußbälle**

WEITERE RUBRIKEN

3 **Editorial**
8 **Leserbriefe/Impressum**
115 **Preisrätsel**
122 **Vorschau**

TITELBILD

Strickmuster für Physiker: Die hier gezeigten Fäden symbolisieren Teilchenzustände im Gitter der Raumzeit, mit denen Quantencomputer arbeiten könnten.

Jean-François Podevin

LESERBRIEFE

Euros werden ebenfalls verfolgt

Das Gesetz des Reisens
April 2006

Mit Interesse habe ich diesen Beitrag gelesen. Eine Verfolgung von Geldscheinen (ähnlich zu der im Artikel erwähnten Seite www.wheresgeorge.com/) gibt es auch für Euros: www.eurobilltracker.com/.

Zurzeit sind etwa 15 Millionen Scheine erfasst. Die Chance, dass der Schein, den man gerade eingegeben hat, schon einmal erfasst wurde, ist daher noch relativ gering (1:300). Da die aufgedruckte Seriennummer das Herkunftsland des Geldscheins verrät, lassen sich schon daraus Rückschlüsse auf die Wanderbewegung ziehen.

Die Statistik der in Österreich eingegebenen Geldscheine zeigt, dass der Anteil der inländischen Scheine von über 95 Prozent zu Beginn des Jahres 2002 inzwischen auf unter 50 Prozent gesunken ist (und vermutlich weiter auf unter 10 Prozent sinken wird). Heute stammen ein Drittel der in Österreich erfassten Scheine aus dem Nachbarland Deutschland. Von den in Deutschland erfassten Scheinen ist ebenfalls noch jeder zweite inländisch, jeder sechste stammt aus Belgien, jeder zehnte aus Österreich.

Alfred Heiligenbrunner, Linz

Auch bunter Gecko ein Reptil

Farbiger Nektar lockt bunte Geckos, Spektrogramm
Mai 2006

Ich bin ein passionierter Leser Ihrer Zeitschrift, die ich für sehr gut halte. In das Maiheft hat sich allerdings ein Fehler eingeschlichen. Der in obigem Beitrag beschriebene Gecko *(Phelsuma ornata)* gehört ja wohl zur Wirbeltierklasse der Reptilien und nicht zu den Amphibien, wie hier, ich hoffe versehentlich, steht.

Helmut Sieber, Weissenburg/Bay.

Keine Besetzung ökologischer Nischen

Geburt eines modernen Ökosystems, April 2006

Formulierungen wie »ökologische Nische besetzen« drücken eine statische Sichtweise von Evolution aus, die zwangsläufig erhebliche Verständnisprobleme mit sich bringt. Seit einem Vierteljahrhundert gilt die dynamische Betrachtungsweise – dachte ich zumindest bis zur Lektüre des oben genannten Artikels. Evolution ist ein Prozess und muss als solcher betrachtet werden. Das bedeutet, dass ökologische Nischen nicht »existieren« und »besetzt« werden, sondern durch Veränderung bestehender oder Auftreten neuer Arten gebildet werden. Die neuen/veränderten Arten bilden nicht nur ihre eigenen Nischen, sondern verändern auch die Nischen der anderen Organismen.

Ein Ökosystem ist also kein Haus mit »ökologischen Nischen« als Zimmer, die entweder bewohnt sind oder nicht, sondern ein komplexes Beziehungssystem, dessen Beziehungsstränge und Knotenpunkte sich permanent in Anzahl und Stärke verändern.

Michael Gansera, Bochum

Briefe an die Redaktion …

… sind willkommen! Schreiben Sie bitte mit Ihrer vollständigen Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Frau Ursula Wessels
Postfach 104840
D-69038 Heidelberg

E-Mail: leserbriefe@spektrum.com

Gene, Anatomie und Hormone

Sein Gehirn, ihr Gehirn
März 2006

Der Artikel kombiniert sehr schön Messdaten von Aktivitäten in einzelnen Regionen der Gehirne mit geschlechtsspezifischen Reaktionen der Versuchspersonen oder -tiere. Die wissenschaftliche Spurensuche und Genauigkeit der Untersuchungen machten Hoffnung, es hier mit seriösen, vielleicht sogar politisch unbeeinflussten Ergebnissen zu tun zu haben.

Allerdings wurden in der vorgestellten Studie lediglich genetisch männliche Gehirne unter Testosteroneinfluss und genetisch weibliche Gehirne und Östrogeneinfluss untersucht. Die Versuchsserie sollte um eine bestimmte Gruppe von Individuen erweitert und um bisherige Ergebnisse ergänzt werden. Als transsexuelle Person weiß ich aus erster Hand, dass nicht allein das genetische Geschlecht über

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Götz Hoeppe, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Christina Peiberg (kom. Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Marc Grove, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 104840, D-69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, D-69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Heidelberg, HRB 338114
Verlagsleiter: Dr. Carsten Könneker
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: marketing@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Markus Fischer, Dr. Werner Saus, Dr. Gabriele Herbst, Claus-Peter Sesín.

Leser- und Bestellservice: Tel. 06221 9126-743, E-Mail: marketing@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, D-70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de
Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn
Bezugspreise: Einzelheft € 6,90/sFr 13,50; im Abonnement € 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 65,40. Die Preise beinhalten € 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 6,00 Portomehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechungserhalt.
Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Hartmut Brendt, Tel. 0211 6188-145, Fax 0211 6188-400; verantwortlich für Anzeigen: Gerlinde Volk, Postfach 102663, D-40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
Anzeigenvertretung: Berlin: Michael Seidel, Friedrichstraße 150, D-10117 Berlin, Tel. 030 61686-144, Fax 030 6159005; Hamburg: Siegfried Sippel, Burchardstraße 17/I, D-20095 Hamburg, Tel. 040 30183-163, Fax 040 30183-283; Düsseldorf: fs//partner, Stefan Schließmann, Friedrich Sültemeier, Bastionstraße 6a, D-40213 Düsseldorf, Tel. 0211 862997-0, Fax 0211 132410; Frankfurt: Klaus-Dieter Mehnert, Eschersheimer Landstraße 50, D-60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 242445-38, Fax 069 242445-55; Stuttgart: Dieter Drichel, Werastraße 23, D-70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-24, Fax 0711 22475-49; München: Karl-Heinz Pfund, Josephspitalstraße 15/IV, D-80331 München, Tel. 089 545907-30, Fax 089 545907-24
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, D-40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 27 vom 01.01.2006.
Gesamtherstellung: Konradin Druck GmbH, Leinfelden-Echterdingen

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.
Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2006 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.
Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Brandfon, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: John Sargent, President and Chief Executive Officer: Gretchen G. Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg, Vice President/ Managing Director, International: Dean Sanderson

Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.

PRESSE Fachhandel

Denkweisen und Empfindungen entscheidet. Ich besitze ein genetisch männliches Gehirn, dass nunmehr unter dem alleinigen Einfluss weiblicher Hormone steht. Meine Wahrnehmung und meine Reaktionen auf die Umwelt haben sich im Zuge der erst kürzlich begonnenen Hormontherapie in einigen Punkten verändert.

So habe ich beispielsweise nach wie Interesse an Mathematik oder Geometrie. Mein Bezug zur Umwelt hat sich jedoch vom methodischen Verständnis über und vom fast spielerischen Interesse an einer Sache hin zu der Frage meines persönlichen Verhältnisses zu dieser dramatisch geändert. Typisch männliche haben sich mit typisch weiblichen Reaktionsmustern und Empfindungen vermischt. Der »kleine Unterschied« kann also nicht allein auf dem genetischen Kode basieren.

Wäre es nicht interessant, die im Artikel vorgestellten Versuche zur Vermessung von Gehirnaktivitäten mit mehreren transsexuellen Menschen zu wiederholen? Es ergäbe sich die Chance, die genetisch bedingten, anatomischen Strukturunterschiede und die über Hormone beeinflussten Reaktionsmuster voneinander zu trennen.

Ines Fritz, Tulln, Österreich

Knall ohne Schall

OH-Karikatur Juni 2006

Die Karikaturen von OH schätze ich meist sehr. Zum Cartoon auf Seite 10 im Juni-Heft möchte ich jedoch Folgendes anmerken: Der Gott in dieser Karikatur ist ein Simulant. Denn wo finden die Schallwellen die Luft beim Urknall, in der sie sich bewegen könnten? Es gab noch keine Luft. Der Urknall war lautlos im luftleeren Raum. Also kein Hörproblem!

Dr. Cornelia Liesenfeld, Augsburg

Das Antiparallelogramm (II)

Physikalische Unterhaltungen Mai 2006

Keine vollständige Umdrehung

Der eigentliche Grund, aus dem die vorgestellten Mechanismen in der Realität nicht zur Übersetzung von Hub- in Drehbewegungen eingesetzt werden, liegt darin, dass die Inversion am Kreis eine Gerade eineindeutig auf einen Kreis abbildet, das heißt jeden Punkt der Geraden auf genau einen Punkt des Kreises und umgekehrt. Damit das Rad also eine vollständige Drehung beschreiben kann, müsste der Hub des Kolbens unendlich sein.

Übrigens können auch zweiachsige Lokomotiven mit Koppelstangen ausgerüstet werden. Die Bewegung der Koppelstange kann nur an zwei Punkten, nämlich im Falle des entarteten Parallelogramms, umschlagen. Da Lokomotiven starre Achsen haben, genügt es, die Arme – also die Befestigungspunkte der Koppelstangen – auf beiden Seiten der Lokomotive um einen von 180 Grad verschiedenen Winkel gegeneinander zu verdrehen.

Martin vor dem Esche, Niederkassel

Erratum

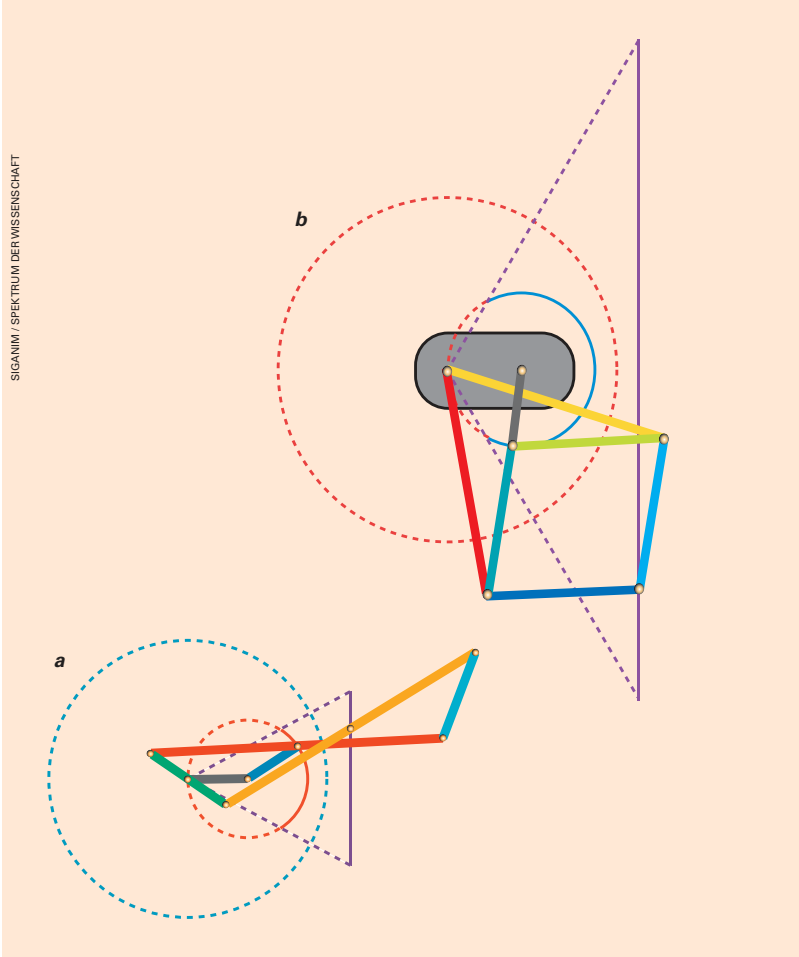
Die beiden Gelenkmechanismen sind verzerrt gezeichnet. Die vier Arme des Parallelogramms beim Peaucellier'schen Inversor (S. 105) müssen alle gleich lang sein, wie in der (korrekten) Skizze rechts daneben. Beim Hart'schen Inversor (S. 106) müssen die langen Arme des Gelenkvierecks gleich lang sein, ebenso die kurzen.

Fritz Diem aus München hat diese Fehler beim Nachbau der abgebildeten Mechanismen entdeckt. Außerdem muss es im Kasten im vorletzten Absatz am Ende der 6. Zeile $\overline{MP'}$ statt $\overline{MP}$ heißen.

Die oben stehenden Zeichnungen zeigen jeweils eine Stellung des Inversors von Hart und von Peaucellier. In Abbildung *a* ist der schwarz gezeichnete Arm des Gelenkmechanismus ortsfest. Beim Hart'schen Inversor (Abbildung *a*) sind es die Mittelpunkte der langen Arme, die sich auf einem Kreis beziehungsweise einer Geraden bewegen, beim Peaucellier'schen Inversor (Abbildung *b*) zwei der vier Ecken der Raute.

Beide Mechanismen in Bewegung zeigen die Kurzfilme des Autors Norbert Treitz unter: www.wissenschaft-online.de/artikel/840852.

Die Redaktion



SIGANIM / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

▲ Die Inversoren von Hart ***(a)*** und Peaucellier ***(b)***. Der jeweils erreichbare Teil des Kreises und der Geraden ist durchgezogen eingezeichnet; violette, gestrichelte Linien kennzeichnen die Extremstellungen der Gelenkmechanismen. Der große, gestrichelte Kreis ist der Inversionskreis.

Exogene Ursachen mitverantwortlich

Aussterben vorprogrammiert? Essay, Juni 2006

Die Samenzellbildung ist ein hoch empfindlicher Prozess.

Zahlreiche Untersuchungen an Tier und Mensch belegen eindeutig, dass er durch chemische und physikalische Einflüsse, durch Substanzen aus der technischen und natürlichen Umwelt, inklusive Medikamenten und medizinischen Therapieverfahren, beeinträchtigt werden kann.

Auch wenn das Phänomen der verminderten Spermiendichte teilweise nur örtlich und zeitlich begrenzt auftritt, muss man dafür exogene Ursachen so lange mitverantwortlich machen, bis das Gegenteil bewiesen ist. Daher ist die Vorstellung, dass die Abnahme der Samenproduktion ausgerechnet jetzt durch einen Adaptationsprozess der Natur bedingt sei, zu gutgläubig.

Prof. Dietrich Klingmüller, Bonn

KOSMOLOGIE

Neues von der Urzeit des Universums

Nach drei Jahren Messzeit hat das Satellitenteleskop WMAP den bisher schärfsten Schnappschuss des frühen Weltalls geliefert. Unter anderem gibt er näheren Aufschluss über die ersten billionstel Sekunden nach dem Urknall und präzisiert das Alter der frühesten Sterne.

Markus Pössel

Jeder Blick ins All zeigt die Vergangenheit. Wer ferne Galaxien beobachtet, der sieht ihren Zustand vor Millionen oder gar Milliarden von Jahren; denn so lange hat das Licht dieser Himmelskörper benötigt, um die Erde zu erreichen. Wo weder Galaxien noch andere kosmische Objekte in die Quere kommen, lässt sich die so genannte kosmische Hintergrundstrahlung nachweisen. Sie liefert gleichsam den frühestmöglichen Schnappschuss des nur etwa 380 000 Jahre alten Universums. Nach seiner Geburt beim Urknall hatte sich das Weltall damals gerade so stark abgekühlt, dass sich stabile Atome bilden konnten. Zuvor war es mit einem undurchsichtigen Plasma gefüllt, das jeden tieferen Blick in die Vergangenheit vereitelt.

Die kosmische Hintergrundstrahlung ist eine Art Wärmestrahlung, wie sie ein glühender schwarzer Körper aussendet: Ihr Spektrum, also die Verteilung der Energie auf die verschiedenen Frequenzbereiche, hängt nur von einem einzigen Parameter ab, der die Bedeutung einer Temperatur hat. Diese ist durch die Expansion des Universums und die resultierende Rotverschiebung in den Jahrmilliarden seit dem Urknall inzwischen auf wenige Grad über dem absoluten Nullpunkt gesunken.

Quantenrauschen und Inflation

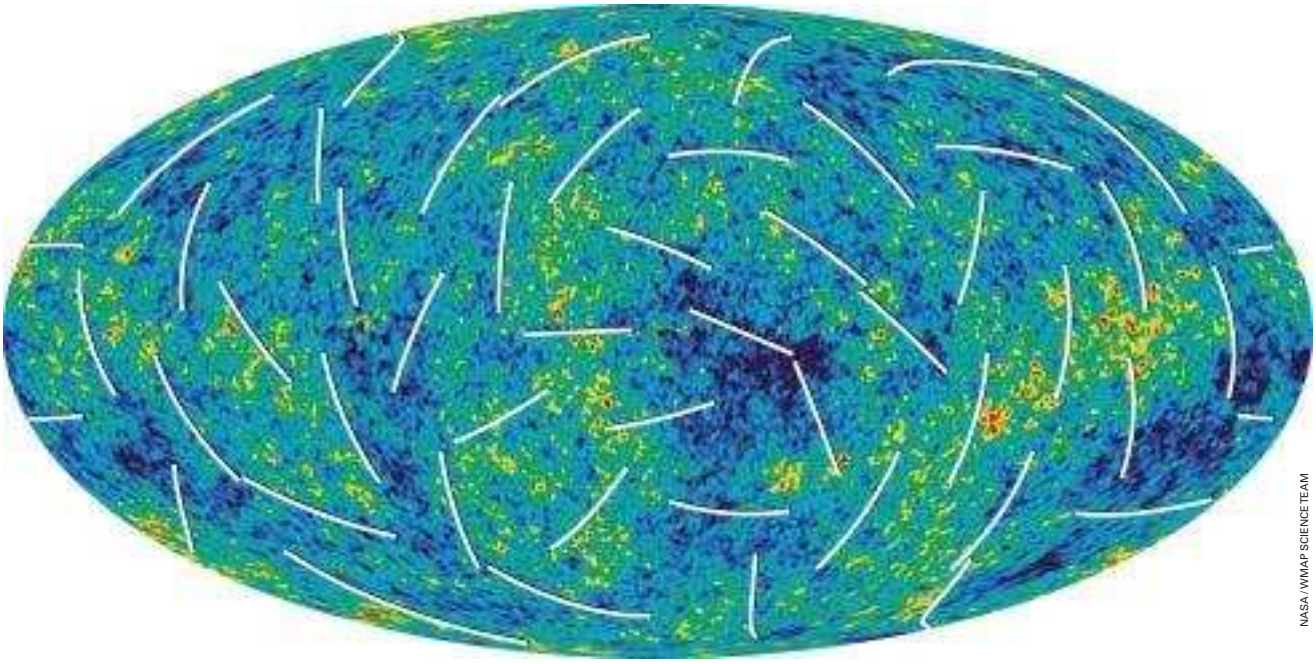
Die Beobachtungen der kosmischen Hintergrundstrahlung seit deren erstem Nachweis im Jahr 1964 haben die Urknallmodelle der modernen Kosmologie glänzend bestätigt. Allerdings waren sie zunächst noch so ungenau, dass sie nur ein recht verschwommenes Bild des frühen Universums lieferten. Erst durch Präzisionsmessungen der letzten Jahre, die wir vor allem dem im Juni 2001 gestarteten Nasa-Satelliten »Wilkinson Microwave Anisotropy Probe« (WMAP) verdanken, ist daraus eine scharf gestochene Aufnahme geworden. Sie enthält Informationen über Alter, Struktur, Zusammensetzung und Dichteverteilung des damaligen Kosmos, lässt aber auch Rückschlüsse auf eine viel frühere Epoche – wenige Sekundenbruchteile nach dem Urknall – sowie auf die spätere Entstehung der ersten Sterne zu.

Schon die Auswertung der WMAP-Messungen nach nur einem Jahr hatte eine Fülle neuer Erkenntnisse geliefert (Spektrum der Wissenschaft 5/2003, S. 8, und 5/2004, S. 46). Nach drei Jahren Messzeit liegen nun noch präzisere Daten vor, die den Schnappschuss verfeinern und ihm einige ganz neue Puzzlestücke hinzufügen.

Die WMAP-Messungen ergeben eine Art Himmelskarte der Hintergrundstrahlung. Diese zeigt kaum Variation zwischen den verschiedenen Himmelsregionen, was davon zeugt, dass das Universum im Ganzen sehr isotrop ist – genau wie in den Modellen der Kosmologen angenommen. Die Temperatur der Strahlung beispielsweise schwankt je nach Blickrichtung nur um einige zehn- bis hunderttausendstel Grad.

Welche Schlüsse lassen die trotzdem in der Himmelskarte sichtbaren, kleinen Unregelmäßigkeiten und Fluktuationen im Einzelnen zu? Das erschließt sich, wenn man verfolgt, wie sie dem heutigen kosmologischen Standardmodell zufolge entstanden sind.

Beim Urknall, mit dem die Kosmologen ihre Zeitrechnung beginnen, war



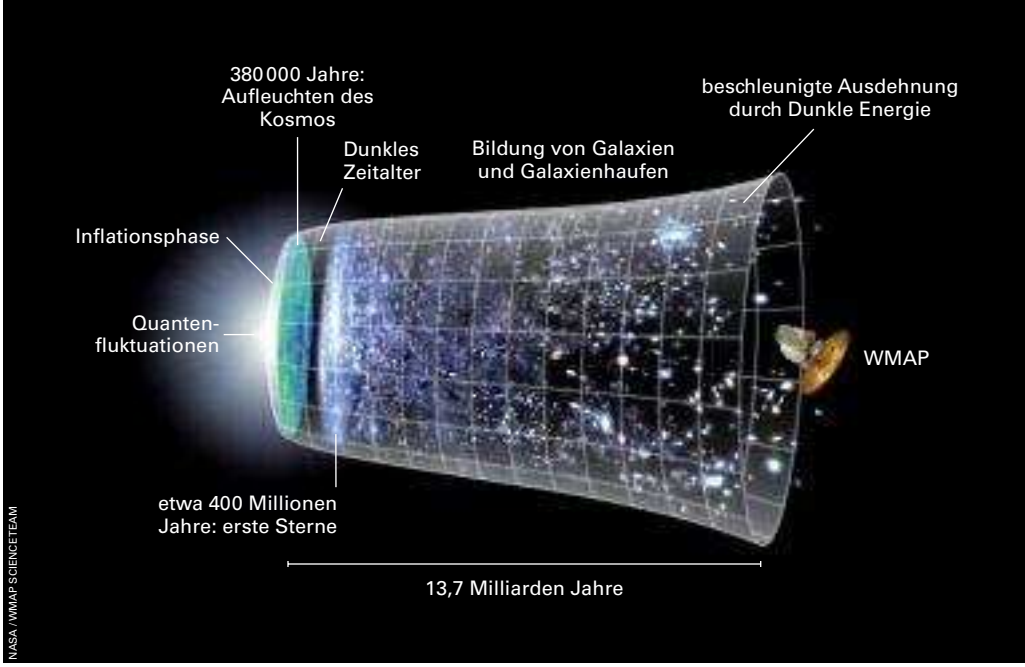
NASA / WMAP SCIENCE TEAM

das gesamte beobachtbare Universum auf einem winzigen Raum zusammengezogen. Schon weniger als eine billionstel Sekunde nach diesem hypothetischen Ausgangspunkt trat es in die so genannte Inflationsphase ein, während derer es sich in kürzester Zeit enorm ausdehnte.

Treibende Kraft war ein mit Hilfe der Quantentheorie beschreibbares Feld, von dem auch ein Großteil der Energie im aufgeblähten Universum herrührt. Fluktuationen sind in der Quantenwelt unvermeidlich; während der Inflationsphase dehnten sich entsprechende Feldschwankungen zusammen mit ihren Entstehungsgebieten von mikroskopischer zu astronomischer Größe aus, wodurch der so entstandene Kosmos in einigen Regionen etwas mehr, in anderen etwas weniger Energie enthielt. Die Einzelheiten dieser rapiden frühen Expansion sind freilich noch sehr unsicher, und derzeit gibt es eine ganze Reihe konkurrierender Modelle dafür.

Nach dem Ende der Inflationsphase blieben die Unregelmäßigkeiten erhalten. In der Zeitspanne von den ersten Minuten bis zu einigen hunderttausend Jahren, als das Universum zum einen mit einem Plasma aus Atomkernen und Elektronen, zum anderen mit so genannter Dunkler Materie gefüllt war, machten sie allerdings tief greifende Veränderungen durch. Im Plasma verursachten sie im Zusammenspiel mit den elektromagnetischen Kräften Dichteschwingungen, die sich ausbreiteten und die Fluktuationen teils glätteten, teils aber auch verstärkten. Die Dunkle Materie, die per Definition nicht elektromagnetisch wechselwirkt, sammelte sich währenddessen bevorzugt in den Regionen höherer Energie und vertiefte so das Ungleichgewicht.

Als sich rund 380 000 Jahre nach dem Urknall Kerne und Elektronen zu stabilen Atomen vereinigten und damit die freien Ladungsträger verschwanden, endete auch die intensive Wechselwirkung zwischen Plasma und elektromagnetischer Strahlung und damit zugleich die Ausbreitung elektromagnetisch getriebener Dichteschwingungen. Die Inhomogenitäten im Kosmos zu diesem Zeitpunkt blieben als eine Art Fingerabdruck in der kosmischen Hintergrundstrahlung erhalten, die dadurch regional variiert: Je nachdem, ob sie aus Regionen größerer oder geringerer Dichte stammt, ist ihre Temperatur geringfügig tiefer oder höher.



Aus den neuen WMAP-Daten ergibt sich das hier gezeigte Bild von der frühesten Entwicklung des Kosmos.

Die ersten Sterne

In den nächsten Hunderten von Millionen Jahren prägten sich die schon vorhandenen Dichteunterschiede noch stärker aus. Ursache war die Gravitation, die dafür sorgte, dass Regionen mit einem Massenüberschuss weitere Materie aus der Umgebung anzogen, während Bereiche geringer Dichte noch mehr ausdünnten. Mit der Zeit bildeten sich Verklumpungen, die kompakt und heiß genug waren, um Kernfusionsreaktionen zu zünden: Die ersten Sterne entstanden. Ihre Strahlung zerlegte neutrale Wasserstoffatome in den umgebenden Gaswolken wiederum in Kerne und Elektronen. Diese »Reionisierung« hinterließ frische Spuren in der kosmischen Hintergrundstrahlung, die in der Zeit davor nur abgekühlt, aber sonst unverändert geblieben war.

In den folgenden Jahrmilliarden wuchsen sich die urtümlichen Dichteschwankungen bis zur heutigen großräumigen Struktur des Universums mit seinen Galaxien und Galaxienhaufen aus. Der Schnappschuss, den die Hintergrundstrahlung bewahrte, wurde dabei nicht weiter verfälscht. Er sollte allerdings, falls der Weltraum insgesamt wie die höherdimensionalen Entsprechungen einer Kugel- oder Sattelfläche gekrümmt wäre – diese Möglichkeit lassen die Urknallmodelle zu –, wie durch eine Art optische Linse verzerrt worden sein.

Entscheidend für die Kosmologen ist nun, dass sich im Bild, das die Fluktuationen am heutigen Nachthimmel bieten, die verschiedenen prägenden Einflüsse auseinander halten lassen. Man muss dazu nur die Stärke der Fluktuationen auf verschiedenen Größenskalen bestimmen. Als Maßstab verwenden die Kosmologen den Winkelabstand und fragen zum Beispiel, wie sich im Mittel die Eigenschaften von zwei Himmelsregionen unterscheiden, die 180 Grad auseinander liegen, also wie der Polarstern und das Kreuz des Südens entgegengesetzte Positionen am Firmament einnehmen. Analog ermitteln die Forscher den durchschnittlichen Unterschied bei Winkelunterschieden von 90, 60, 45 Grad und so weiter, bis hinunter zu weniger als einem halben Grad.

Wegen der Dichteschwingungen im Plasma, aus dem das Universum unmittelbar nach der Inflationsphase bestand, sollten die Temperaturabweichungen für einige Winkelabstände besonders groß, für andere dagegen minimal sein. An der Lage und Ausprägung dieser Extreme lässt sich somit zum Beispiel ablesen, wie hoch die Anteile der elektromagnetisch wechselwirkenden normalen und der ▷

Detaillierter denn je verzeichnet die jüngste Himmelskarte des Satelliten WMAP Schwankungen der kosmischen Hintergrundstrahlung. Deren Mitteltemperatur ist in Grün dargestellt. Kühlere Gebiete erscheinen in Blau, wärmere dagegen in Gelb und Rot. Die weißen Linien geben an, in welcher Ebene die Strahlung aus den entsprechenden Regionen bevorzugt schwingt.

▷ verklumpungsfreudigeren Dunklen Materie im Kosmos sind. Die Verzerrung, die der Schnappschuss durch die Raumkrümmung erfahren hat, gibt zugleich einen Hinweis auf die Gesamt-Energiedichte des Weltalls.

Kosmologische Parameter bestimmt

Im Standardmodell des Kosmos hängt der Verlauf der kosmischen Expansion lediglich von drei Parametern ab: der Energiedichte aller vorhandenen Materie, der Dichte der so genannten Dunklen Energie, die bereits dem materiefreien Raum eine Tendenz verleiht, sich zusammenzuziehen oder auszudehnen, und dem Referenzzeitpunkt, zu dem die beiden Größen bestimmt werden. Die WMAP-Daten allein schränken die möglichen Werte dieser Parameter bereits stark ein, und sobald man nur einige wenige Informationen aus anderen astronomischen Messungen hinzunimmt, stehen sie fest.

Insgesamt ergibt sich, dass unser Universum 13,7 Milliarden Jahre alt ist und nur zu vier Prozent aus herkömmlicher sichtbarer Materie besteht; 22 Prozent seiner Energiedichte entfallen auf die Dunkle Materie und 74 Prozent auf die Dunkle Energie, welche die Expansion des Weltalls beschleunigt. Diese Werte passen vorzüglich zu einer ganzen Reihe weiterer astronomischer Beobachtungen. Sie demonstrieren aber auch den erschreckenden Grad unserer Unkenntnis – besagen sie doch, dass das Weltall zu 96 Prozent mit etwas gefüllt ist, über dessen nähere Eigenschaften heutige Physiker nur spekulieren können.

Diese Erkenntnisse hatte im Prinzip schon die Auswertung der WMAP-Daten nach dem ersten Jahr ergeben. Die jüngst veröffentlichten Messungen erbrachten jedoch auch neue Einsichten. Das lag entscheidend daran, dass sich nun zugleich die Polarisation der Hintergrundstrahlung, die uns von den verschiedenen Himmelsregionen erreicht, recht genau bestimmen ließ. Die neue Himmelskarte zeigt dadurch auch, ob die elektromagnetischen Wellen bevorzugt in einer bestimmten Ebene oder aber in beliebiger Richtung schwingen. Das entsprechende Signal ist noch rund zehnmal schwächer als die Temperaturschwankungen; um es überhaupt registrieren zu können, mussten die WMAP-Forscher ihre Mess- und Auswertungsmethoden von Grund auf überholen und sorgfältige Tests durchführen, damit sich alle möglichen Störeinflüsse berücksichtigen ließen.

Die Unregelmäßigkeiten in der Polarisation der Hintergrundstrahlung hängen besonders empfindlich davon ab, wann die Reionisierung stattfand. Ihre Auswertung ermöglicht daher zum einen, den Zeitpunkt, zu dem die ersten Sterne entstanden, genauer festzulegen – auf 250 bis 550 Millionen Jahre nach dem Urknall. Zum anderen liefert die Kombination der Daten über die Variationen in der Temperatur und im Polarisationsgrad wichtige Hinweise auf den Ursprung der Dichteschwankungen. Dies erlaubt tiefere Einblicke in das Universum während der ersten billionstel Sekunden nach dem Urknall als jemals zuvor.

Insbesondere sind die WMAP-Daten mit den einfachsten Inflationsmodellen gut vereinbar. Zugleich haben sie die Vielfalt der mit der Beobachtung verträglichen Modelle merklich reduziert – ein nicht zu verachtender Zuwachs unseres Wissens über das früheste Universum. Die vorliegenden Messergebnisse schließen auch einige einfache Alternativen zur Inflation aus – etwa einen Fluktuationsmechanismus, in dem Unregelmäßigkeiten aller Größenskalen gleichberechtigt wären. Andere konkurrierende Modelle wie das ekpyrotische Universum bleiben dagegen im Rennen.

Eine deutlichere Entscheidung zwischen den verschiedenen Theorien verspricht die Messung noch weit schwächerer Unregelmäßigkeiten in der Polarisation, die auf Gravitationswellen (sich fortpflanzende Raumverzerrungen) im frühen Universum zurückgehen sollten. Ob WMAP auch diese Schwankungen ermitteln kann oder ob ihre Messung dem Planck-Satelliten der Europäischen Weltraumagentur Esa vorbehalten bleibt, der 2008 ins All starten soll, dürfte sich in den nächsten Jahren zeigen.

Markus Pössel ist promovierter Physiker und wissenschaftlicher Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik in Potsdam.

NEUROLOGIE

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen, siehe: www.spektrum.de/audio

Autismus spiegelt sich im Gehirn

Neuen Untersuchungen mittels Kernspintomografie zufolge sind bei autistischen Kindern die »Spiegelneuronen«, mit deren Hilfe wir uns in andere Menschen hineinversetzen können, kaum aktiv.

Von Stephanie Hügler

Raymond lebt in seiner eigenen Welt. Er spricht wenig, führt seltsame Listen und bekommt einen Tic, wenn er sich bedroht fühlt. Gleichzeitig verfügt er über ein verblüffendes Zahlengedächtnis. Seine Geschichte und die seines Bruders Charlie, der ihm schrittweise näher kommt, bewegte in dem Film »Rain Man« Ende der 1980er Jahre Millionen von Kinobesuchern. Raymond, so erfuhren die Zuschauer, war ein Autist. Trotz seiner ausgeprägten Begabung für Zahlen konnte er Alltagssituationen schlecht bewältigen. Immer wieder nahmen seine Gespräche mit dem Bruder absurde Züge an.

Genau dies ist das besondere Merkmal von Autisten – dass sie unfähig sind, angemessen mit anderen zu kommunizieren, weil sie deren Gefühle nicht deuten und verstehen können. Deshalb kapseln sie sich ab, sprechen nicht oder kaum und vermeiden den Blick- und Körperkontakt. Da jede Veränderung ihrer Umwelt sie stark beunruhigt, bestehen sie meist zwanghaft auf Ordnung und wiederholen immer wieder dieselben Verhaltensweisen oder sprachlichen Äußerungen (Echolalie). Oft kompensieren sie ihr Defizit im Bereich der Beziehungen und der Kommunikation durch die Ausbildung hoch komplexer analytischer Fähigkeiten.

Schon seit Längerem vermuten Wissenschaftler hinter der gestörten Psyche von Autisten deren Unvermögen, eine »Theory of Mind« zu entwickeln. Darunter verstehen Psychologen die Fähigkeit zu erkennen, dass andere Menschen eigene Vorstellungen, Wünsche und Absichten haben können. Sie ist eine wesentliche Voraussetzung zur Entwicklung von Mitgefühl. Inzwischen glauben die Forscher auch zu wissen, wo diese Fähig-

Während autistische und normal entwickelte Kinder diese Bilder zunächst nur betrachteten und dann den Gesichtsausdruck nachahmten, maßen Wissenschaftler ihre Gehirnaktivität.

keit, sich in andere hineinzuversetzen, im Gehirn residiert. Den ersten Hinweis darauf gaben Anfang der 1990er Jahre Experimente von Giacomo Rizzolatti.

Der Leiter des Physiologischen Instituts der Universität Parma (Italien) untersuchte bei Makaken den prämotorischen Cortex – eine Region im Stirnhirn, die eine entscheidende Rolle bei der Koordination und Ausführung zielorientierter Bewegungen spielt. Mit implantierten Elektroden ermittelten er und seine Mitarbeiter, unter welchen Bedingungen dort Neuronen aktiv werden. Dazu platzierten die Forscher Früchte in Reichweite eines Versuchstiers und beobachteten, was passierte, sobald es danach griff. Wie erwartet, feuerten während der Armbewegung Nervenzellen im prämotorischen Cortex. Das geschah unter anderem in einem Feld namens F5.

Zur Überraschung der Forscher zeigte dieses Areal allerdings auch schon vorher Aktivität – und zwar in dem Moment, wenn der menschliche Versuchsleiter die Früchte hinlegte. Rizzolatti schloss daraus, dass die Nervenzellen im Stirnbereich des Affen nicht nur dazu dienten, seine eigenen Bewegungen zu lenken. Offenbar »spiegelten« sie auch die Bewegungen des Versuchsleiters – als wäre das Tier an dessen Stelle.

Von Anfang an bestand Grund zu der Annahme, dass auch wir Menschen über solche Spiegelneuronen verfügen. Allerdings ließen sie sich nicht ohne Weiteres nachweisen – schließlich kann man in die Gehirne menschlicher Versuchspersonen nicht einfach Elektroden einpflanzen. Mittlerweile gibt es jedoch eine Reihe von Untersuchungen, welche die Existenz von Spiegelneuronen beim Menschen nahelegen.

Dabei hat sich auch gezeigt, dass diese besonderen Nervenzellen für weit mehr zuständig sind als für das bloße Nachvollziehen von Bewegungen. Offenbar spielen sie auch eine wichtige Rolle bei der Entwicklung des Mitgefühls. So wies Tania Singer vom University College ▷

ANZEIGE

ANZEIGE

ANZEIGE

▷ London nach, dass sie die Schmerzzentren im Gehirn einer Versuchsperson aktivieren, wenn diese beobachtet, wie einem geliebten Menschen Leid zugefügt wird.

Schon früh lernen Kinder durch Nachahmen, die Gefühle der Mutter und anderer Bezugspersonen zu verstehen. So sind sie, wie Psychologen herausgefunden haben, bei normaler Entwicklung ab dem zweiten bis dritten Lebensjahr zur Empathie fähig. Parallel dazu entwickeln die Kleinen offenbar auch die besagte »Theory of Mind«. Genau zu diesem Zeitpunkt aber macht sich bei vielen autistischen Kindern die Krankheit erstmals deutlich bemerkbar.

Die Vermutung lag deshalb nahe, dass ein Zusammenhang zwischen Spiegelneuronen und Autismus besteht. Bei Erwachsenen konnte ein Team um Hugo Théoret von der Universität Montreal kürzlich zumindest indirekte Hinweise darauf finden *(Current Biology, Bd. 15, S. R84)*. Es maß die Reaktion des motorischen Kortex von Autisten auf eine äußerliche (transkraniale) magnetische Stimulation am Schädel. Untersuchungen bei normal entwickelten Personen hatten zuvor gezeigt, dass sich die Intensität der durch diese Reizung ausgelösten »motorisch evozierten Potenziale« ändert, wenn die Betroffenen Handbewegungen anderer Personen verfolgen. Bei Autisten ist dies, wie Théoret und seine Kollegen zeigten, nur in viel schwächerem Maß der Fall.

Analoge Untersuchungen haben Mirella Dapretto von der Universität von Kalifornien in Los Angeles und ihre Mitarbeiter jetzt bei autistischen Kindern durchgeführt *(Nature Neuroscience, Bd. 9, S. 28)*. Erstmals konnten sie so unmittelbar nachweisen, dass bei diesen in Situationen, die zum Mitgefühl anregen, das Spiegelneuronen-Areal schwächer feuert als bei ihren normalen Altersgenossen. Für ihre Untersuchung benutzten die Forscher die funktionelle Kernspintomografie, bei der sich über die Stärke der Durchblutung einer Hirnregion deren Aktivierung messen lässt.

Imitation ohne Emotion

Die Forscher scannten die Gehirne von jeweils zehn normal entwickelten und zehn autistischen Kindern im Alter zwischen neun und fünfzehn Jahren. Währenddessen präsentierten sie ihnen in zufälliger Reihenfolge jeweils zwei Sekunden lang insgesamt achtzig Gesichter, die Empfindungen wie Wut, Angst, Glück und Trauer oder einen neutralen Ausdruck zeigten. In einem zweiten Durchlauf sollten die Kinder dann die vorgeführten Gesichtsausdrücke imitieren. Auch dabei wurden kernspintomografische Aufnahmen von ihren Gehirnen gemacht.

Wie sich zeigte, konnten autistische Kinder die ihnen dargebotenen Gesichter genauso gut nachahmen wie ihre normal entwickelten Altersgenossen. Doch waren bei ihnen sowohl während der bloßen Beobachtung als auch beim Imitieren andere Gehirnbereiche aktiv.

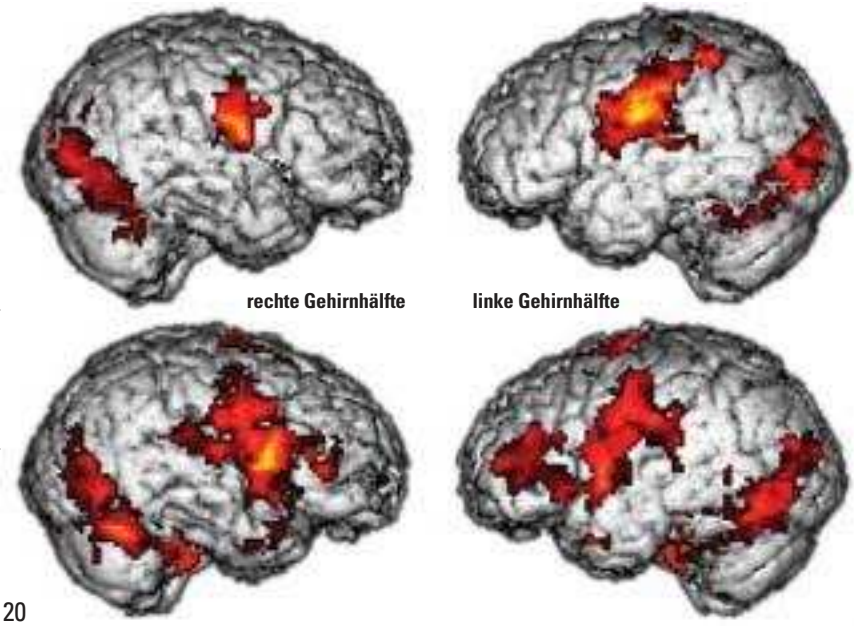
Bei den normal entwickelten Kindern feuerten der motorische und prämotorische Kortex sowie das ebenfalls an motorischen Prozessen beteiligte Kleinhirn. Besonders starke Aktivität herrschte im *Pars opercularis*, und im benachbarten *Pars triangularis,* dem Gegenstück des Areals F5 der Makaken. Aktiv waren aber auch die Zentren, die über das limbische System mit Gefühlen in Verbindung stehen – die Amygdala, die Insula und das ventrale Striatum.

Ganz anders verhielt es sich bei den autistischen Kindern. Ihre grauen Zellen funkten zwar ebenfalls in Regionen, die das Kommando über Bewegungsabläufe führen. Im Bereich der Spiegelneuronentat sich jedoch fast nichts; auch die Gefühlszentren reagierten schwächer. Dafür zeigten die kernspintomografischen Aufnahmen Aktivität in vielen Gehirnregionen, die mit der Verarbeitung visueller Reize zu tun haben – wie im *Gyrus fusiformis*.

Demnach nahmen die autistischen Kinder, so die Schlussfolgerung der Forscher, die Gesichtsausdrücke zwar wahr und führten die zur Imitation erforderlichen Bewegungen aus. Allerdings nutzten sie dazu andere neuronale Mechanismen: Während die normal entwickelten Kinder offenbar mit Hilfe der Spiegelneuronen die Bedeutung der Mimik sofort nachfühlen und intuitiv verstehen konnten, waren ihre autistischen Altersgenossen dazu anscheinend nicht in der Lage. Dieses Defizit kompensierten sie durch stärkere visuelle und motorische Aufmerksamkeit. Wie die geringe Aktivierung des limbischen Systems zeigt, weckte die emotional aufgeladene Mimik zudem kaum ihr Mitgefühl.

Die Untersuchung von Dapretto und ihren Kollegen liefert den bisher überzeugendsten Beleg dafür, dass wir nur dank der Spiegelneuronen die Stimmungen und Handlungsweisen anderer auf einen Blick verstehen können und dass es an einem Defekt dieses Systems liegt, wenn Kinder zu Autisten heranwachsen. Besonders deutlich zeigte sich das an einer auffälligen Korrelation: Die Spiegelneuronen der psychisch gestörten Kinder feuerten umso schwächer, je stärker ausgeprägt die autistischen Symptome waren.

Beim Betrachten und Nachahmen emotionaler Gesichtsausdrücke waren Regionen im Vorderhirn, die mutmaßlich Spiegelneuronen enthalten, bei Autisten (oben) weit weniger aktiv als bei normal entwickelten Kindern (unten).



MIRELLA DAPRETTO, DEPT. OF NEUROSCIENCE, UCLA

Stephanie Hügler hat Psychologie studiert und ist freie Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.

GERHARD SAMULAT

Unter den wachen Augen der Jury zeigt der RoboScout der Base Ten Systems GmbH aus dem bayerischen Hallbergmoos seine Fähigkeiten beim ersten »European Land-Robot Trial« (Elrob) in Hammelburg. Er ist ausschließlich fürs offene Gelände konzipiert und wird über Satellit gesteuert.

ROBOTIK

Blechkameraden für die Front

Auf dem ersten »European Land-Robot Trial« offenbarten gut vierzig Unternehmen und Forschungseinrichtungen aus acht Nationen drei Tage lang Stärken und Schwächen ihrer ferngelenkten Fahrzeuge für das Militär.

Von Gerhard Samulat

Als erster Testkandidat steht Telemax an der Startlinie. Gespannt registrieren die umstehenden Beobachter, die meist in bräunlich grün gefleckten Uniformen stecken und ein farbiges Barett auf dem Kopf tragen, jede kleinste Bewegung des Roboters. Doch der spannt sein Publikum auf die Folter. Minute um Minute verrinnt. Der bereifte Kasten verharrt gut eine halbe Stunde regungslos an Ort und Stelle. Nur sein gelenkiger Greifarm, auf dem eine Kamera sitzt, fährt langsam aus und schwenkt behutsam mal hier hin, mal dort hin. Dann passiert wieder lange Zeit gar nichts. Viele glauben, das Gerät sei defekt. Doch plötzlich rollt es zögerlich einige Meter innen an der Begrenzungslinie der abgesteckten Wettkampffläche entlang. Von dort aus inspiziert es erneut das gut achtzig Quadratmeter große Areal. Schließlich fährt Telemax, ohne zu drehen, auf dem gleichen Weg zu seinem Startplatz zurück.

Die meisten Zuschauer, die auf Einladung der Bundeswehr auf den mitteldeutschen Truppenübungsplatz nahe der unterfränkischen Kleinstadt Hammelburg gekommen sind, um sich von dem Können der elektronischen Wunderkisten zu überzeugen, sind irritiert. War das alles? »Die Organisatoren sagten, sie hätten einige ›Überraschungen‹ auf dem Feld versteckt. Und da wollten wir nicht blindlings in die Fallen tappen«, erklärt Andreas Ciossek, der das Gerät von einem entfernt liegenden Zelt aus überwacht und gelenkt hat, ohne es sehen zu können. Er ist Softwareentwickler beim Hersteller von Telemax, der vor Kurzem von Rheinmetall aufgekauften telerob Gesellschaft für Fernhantierungstechnik, die gleich mehrere Kandidaten in den Wettbewerb geschickt hat.

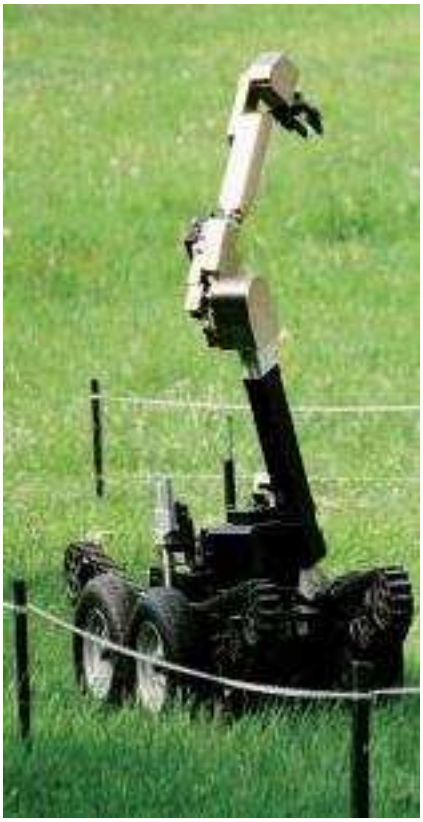
Räumkommando an Roboter

Wenig später kommen hoch dekorierte Offiziere und klopfen dem Team beglückwünschend auf die Schultern. »Bis auf kleine, als grüne Schmetterlinge getarnte Sprengkörper haben wir alles gefunden«, sagt Ciossek. »Selbst den übers Feld gespannten Draht, dessen Berührung eine Sprengladung ausgelöst hätte, haben wir mit unserer hochauflösenden Kamera sofort entdeckt«, erzählt er mit einem gewissen Stolz.

Ein solcher Kundschafter wäre für das Heer Gold wert. »Schließlich ist der Infanterist stets mitten drin«, betont Generalmajor Wolfgang Korte: »Seine Kampfdistanz ist die Armlänge. Und er wird aus jeder Richtung rund um die Uhr bedroht.« Von den unbeseelten Geräten erhoffen sich die Militärs Unterstützung vornehmlich bei der Aufklärung und beim Räumen von Kampfmitteln. »Derzeit geben wir jedes Jahr einen siebenstelligen Eurobetrag für derartige Technik aus«, verrät Harald Stein vom Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung.

Trotzdem gibt es Nachholbedarf. »Während wir mit fliegenden Systemen bereits gute Erfahrungen haben«, meint Brigadegeneral Reinhard Kammerer vom Führungsstab des Heers, »verfügt die Bodentruppe noch über keinen zufrieden stellenden Überblick, was den Einsatz von Robotern anbelangt.« Zwar beschäftigt sich die Bundeswehr seit geraumer Zeit damit, Anforderungen an autonome oder ferngesteuerte Hilfen zu formulieren. »Dennoch ist das Heer noch nicht einmal in der Lage, seinen Bedarf oder gar einen Kriterienkatalog zu definieren«, verrät Korte. Zu komplex sind die Aufgaben.

Um sich einen Überblick über den Leistungsstand der europäischen Firmen und Forschungseinrichtungen auf diesem Gebiet zu verschaffen, blies das Heer daher zum ersten Europäischen Wettstreit für Landroboter, kurz Elrob (nach englisch *European Land-Robot Trial*). Im Gegensatz zum Grand Challenge, einem ähnlichen Turnier in den USA, das im vergangenen Jahr ein Team unter Leitung des Deutschen Sebastian Thrun mit einem VW Touareg gewann, ging es bei der europäischen Veranstaltung nicht darum, möglichst schnell große Distanzen zurückzulegen. »Das entspricht weniger ▷



LINKS: GERHARD SAMULAT; RECHTS: TELEROB / RHEINMETALL

Der mittelgroße Telemax der telerob Gesellschaft für Fernhantierungstechnik kommt mit seinen bereiften Rädern und den ausklappbaren Kettenraupen auf Straßen wie in unwegsamem Gelände optimal voran. Im kompakten, zusammengefalteten Zustand (unten) passt er auch durch enge Tunnel und Passagen. Mit seinem ausfahrbaren Greifarm, an dem eine hochauflösende Kamera sitzt, kann er sich jederzeit einen guten Rundumblick verschaffen (links).

den Bedürfnissen des Heers«, sagt Korte. Zudem fassen die hiesigen Militärs den Begriff Roboter nicht so eng wie ihre US-Kollegen. Ließen die Organisatoren des Grand Challenge ausschließlich autonom fahrende Vehikel zu, so gingen bei Elrob ausnahmslos funkferngesteuerte Fahrzeuge an den Start.

In drei Wettbewerben durften die Kandidaten ihr Können unter Beweis stellen: Sie mussten entweder auf einer abgesteckten Fläche Minen und Sprengmittel aufspüren, ein präpariertes Dorf erkunden oder einen hindernisreichen Parcours durchfahren. Viele Roboter unterzogen sich allen drei Prüfungen. Ihr Variantenreichtum war enorm; er reichte vom satellitengesteuerten Panzerfahrzeug bis zum kleinen Aufklärungsroboter.

Erkunden eines präparierten Dorfs

Nach dem Geduldspiel bei der Detektion von Sprengfallen ging es am zweiten Tag deutlich spannender zu. Diesmal sollten die ferngelenkten Fahrzeuge Feuer und Hindernisse in einer präparierten Ortschaft umgehen, Autowracks und Scheunen durchsuchen sowie in Häuser eindringen, um dort Tische und Schränke zu inspizieren.

Einige Teilnehmer scheiterten an diesem Szenario, weil die Datenverbindung zum Steuerzentrum abbrach. »Meist arbeiten die Universitäten mit kommerziellen Komponenten für die Funktechnik, die nur über wenige hundert Milliwatt Sendeleistung verfügen«, erläutert Ciossek, dessen Maschine auch auf diesem Parcours gut abschnitt. »Schnell bricht daher die Verbindung zusammen, wenn zu viele Mauern im Weg stehen.« Telemax nutzt dagegen ein starkes Videosignal. »Bevor er den Kontakt verliert, merken wir das schon am Rauschen der Kameras«, erklärt Ciossek. »Und notfalls können wir blind fahren.«

Solche Ausfälle verunsichern das Militär. Oberste Priorität im Feld hat stets die Zuverlässigkeit sowie die Sicherheit von Mensch und Maschine. »Das Wichtigste ist, dass der Soldat das System jederzeit ausschalten kann«, meint denn auch ein Beobachter des israelischen Verteidigungsministeriums, der seinen Namen nicht nennen möchte. »Es darf nicht sein, dass so eine Maschine unkontrolliert eine Gefahr für die eigenen Streitkräfte darstellt.« Der Israeli ist von der europäischen Leistungsschau ebenso angetan wie sein Kamerad von den US-Streitkräften.

Am dritten Tag auf dem Freigelände sollten die Vehikel schließlich demonstrieren, wie robust sie sind. Da mussten sie sich durch losen Sand, Geröll oder Matsch wühlen, Felsen und Steigungen erklimmen sowie Baumstämmen und Feuer ausweichen. Hier erwies sich die Wahl der Fortbewegungsmittel als entscheidendes Kriterium. »Im unebenen Gelände sind Ketten unschlagbar«, erläutert Henrik Christensen vom European Robotics Research Network (Euron), der als oberster Schiedsrichter in diesem Wettstreit fungierte. »Will man auf Straßen schnell vorankommen, ist man dagegen mit Rädern besser beraten.«

Manches Fahrzeug, das viele der künstlichen Schwierigkeiten mit Bravur meisterte, scheiterte allerdings an einem ungeplanten natürlichen Hindernis. Am dritten Tag herrschte schlechtes Wetter mit teils heftigen Regenschauern. Deshalb musste, da etliche Prototypen nicht wasserfest waren, der Leistungsvergleich mehrfach unterbrochen werden.

Keiner kann alles

Wegen der Vielfalt der Aufgaben, gab es naturgemäß keine Maschine, die alle Prüfungen gleich gut bewältigte: War beispielweise ein Gerät zu klein, um Tische oder Regale in einem Gebäude zu inspizieren, so waren andere zu breit, um dort überhaupt eindringen zu können. Einen guten Kompromiss boten mittelgroße Fahrzeuge wie Telemax oder der Vertreter der Universität Würzburg namens Merlin. Dieser ist klein genug, um durch Tunnel zu kriechen, verfügt zugleich aber über einen ausfahrbaren Arm mit einer Suchkamera. Zwar stürzte das bereifte Fahrzeug im Gelände. Dank seines Arms konnte es sich aber von selbst wieder aufrichten, was ihm sicherlich Pluspunkte bei den Juroren einbrachte.

Am Ende gab es allerdings weder einen Sieger noch eine Siegprämie – ein weiterer Unterschied zum Grand Challenge, für den die Technologieabteilung Darpa des US-Verteidigungsministeriums ein großzügiges Preisgeld von zwei Millionen Dollar zur Verfügung stellt. Die Teilnahme dürfte sich für die meisten Wettbewerber dennoch gelohnt haben. Für jedes Gerät erstellte die Jury eine interne Bewertung, die sie unter vier Augen mit den Herstellern besprach. Früher oder später darf sich der eine oder andere sicher Hoffnungen auf einen lukrativen Auftrag machen.

Gerhard Samulat ist Diplomphysiker und freier Wissenschaftsjournalist in Wiesbaden.

PSYCHOLOGIE

Nur ein frommer Wunsch

Das Flehen um göttlichen Beistand bei Krankheit erwies sich im wissenschaftlichen Test als wirkungslos, ja teils sogar schädlich.

Von Christine Soares

Sie wollten herausfinden, ob Fürbitten Außenstehender einem Patienten nach der Operation nützen. Doch das Ergebnis war ernüchternd für alle, die auf die Hilfe übernatürlicher Instanzen vertrauen. Nur eines konnten die Wissenschaftler feststellen: den schädlichen Einfluss negativen Denkens.

Die dreijährige »Studie über die therapeutische Wirkung fürbittenden Betens« (STEP nach englisch *study about therapeutic effects of intercessory prayer*) war der bisher umfangreichste Versuch, mit wissenschaftlichen Methoden herauszufinden, ob die Anrufung einer himmlischen Macht das Wohlergehen einer dritten Person beeinflussen kann. Als Probanden fungierten 1800 Herzkranke, die sich einer Bypass-Operation unterzogen. Am Vorabend des Eingriffs begannen klösterliche Gemeinschaften für die eine Hälfte der Patienten zwei Wochen lang zu beten. Auf jeden Kranken entfielen dabei siebzig fromme Fürsprecher, von denen keiner das Objekt seiner Bemühungen persönlich kannte.

Doch alles Bestürmen des Himmels half nichts: Die Auswertung ergab keinen Unterschied bei der Überlebens- und Komplikationsrate zwischen denen, für die gebetet wurde, und den anderen. Der ▷

ANGEMERKT

Pubertäre Menschheit

Schon Immanuel Kant schrieb: »Mit dem Dressieren ist es noch nicht ausgerichtet, sondern es kommt vorzüglich darauf an, dass Kinder denken lernen.« Und fürwahr, die Aufzucht von menschlichem Nachwuchs ist langatmig und mitunter nicht ganz einfach. Auch dauert sie viel länger als bei allen anderen Primaten.

Eine solche verzögerte Adoleszenz erscheint auf den ersten Blick als evolutionärer Nachteil. Zwar brauchen die schneller heranreifenden Jungen von Menschenaffen mehr Nahrung, aber sie sind auch früher im Vollbesitz ihrer körperlichen und geistigen Kräfte und fähig zum eigenständigen Überlebenskampf sowie zur Fortpflanzung. Dennoch ist, wie Michael Gurven und Robert Walker von der Universität von Kalifornien in Santa Barbara nun akribisch nachgewiesen haben, die menschliche Trödelei offenbar kein Luxus *(»Proceedings of the Royal Society: Biological Sciences«, 7.4.2006, S. 835)*.

Bei einer Art mit hochkomplexen Jagdstrategien lohnt es sich, die körperliche Entwicklung langsam anzugehen. Derweil prägt sich das Gehirn aus, während in jahrelangem Training Wissen erworben wird. Erst wenn dieser langwierige Bildungsprozess so weit gediehen ist, dass der Nachwuchs sich selbst versorgen könnte, schließt auch der Körper im Eiltempo auf und ermöglicht dem nun ausgewachsenen Wesen, das Erlernte in die Praxis umzusetzen.

Betrachtet man den Werdegang der Menschheit als Ganzes, so zeigt sich eine erstaunliche Parallele zu dieser ungewöhnlichen Individualentwicklung. Wie ein Kleinkind lernte unsere Spezies erst sprechen und sehr viel später dann schreiben. Die Erfindung des Rads lässt sich in diesem Sinn mit den ersten Schritten vergleichen. Erstaunlich lange verharrte der *Homo sapiens* in einem relativ primitiven, wenig entwickelten Stadium und erprobte vielerlei Strategien, optimal mit seinem Lebensraum zurechtzukommen. Matriarchat wechselte mit Patriarchat, nomadisches Leben wich festen Siedlungen, auf Sammeln und Jagen folgten Ackerbau und Viehzucht und allgemein gültige Gesetze verdrängten das Recht des Stärkeren. In dieser Lernphase nahmen die technischen Errungenschaften nur ganz allmählich zu.

Doch in den vergangenen zwei Jahrhunderten änderte sich das Bild dramatisch. Innerhalb kürzester Zeit wurden jahrtausendealte Herrschaftsstrukturen gestürzt, die rasanten Fortschritte in Geistes- und Naturwissenschaften nagten an Religion und Mythologie und die Zahl der Menschen explodierte. Mit dem Zeitalter des Humanismus und der Industrialisierung war die Menschheit anscheinend in ihre pubertäre Wachstumsphase eingetreten.

Diese Sicht macht manchen Fehltritt, ja verstörenden Exzess verständlich; schließlich ist die Adoleszenz eine Zeit emotionaler Instabilität. Sind also die verheerenden Weltkriege nur Ausdruck einer halbstarken Kraftmeierei? Die feurigen Bekenntnisse zu Demokratie und Menschenrechten utopische Liebesbriefe? Ist die Umweltverschmutzung unsere Akne? Entspricht die Erforschung des Genoms dem Erwachen der Sexualität? Der Aufbruch ins Weltall dem Auszug aus dem Elternhaus?

Solche Parallelen gibt es viele. Sind sie nur Zufall? Oder spiegeln sie eine verborgene Gesetzmäßigkeit wider? Wenn ja, bestünde immerhin Anlass zur Hoffnung. Dann wäre zu erwarten, dass die Menschheit demnächst ihre pubertäre Sturm- und Drangphase überwindet und in ein reifes Stadium eintritt, in dem sie ihre in langen Jahrtausenden erworbenen technisch-kulturellen Fähigkeiten endlich verantwortungsvoll zum allgemeinen Nutzen anwendet.

Bisher deutet zwar wenig darauf hin. Doch sollten wir uns nicht entmutigen lassen. Schließlich ist schon mancher junge Mensch, der mit seinen wilden Eskapaden Eltern und Erzieher zur Verzweiflung brachte, am Ende noch zu einem wertvollen Mitglied der Gesellschaft geworden. Schon Kant sagte über Schwierigkeiten in der Pädagogik: »Das sind auch nicht immer die schlechtesten Menschen, die störrisch sind.«

Stefan Keilmann

Der Autor hat Germanistik und Philosophie studiert und ist freier Wissenschaftsjournalist in Ludwigshafen.

AP PHOTO, JORGE SAENZ

Fürbitten können trösten, aber nicht wirklich helfen – so das Ergebnis einer wissenschaftlichen Studie.

einzige signifikante Effekt trat in der Untergruppe derjenigen Patienten auf, die um die Fürbitten wussten. Sie litten nach der Operation in stärkerem Maß an Herzrhythmusstörungen als die nicht Eingeweihten (59 gegenüber 52 Prozent).

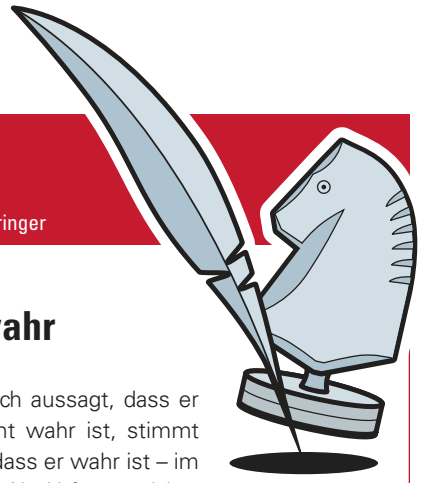
Das Forscherteam – ein Psychologe, ein Priester und Ärzte von sechs Institutionen wie der Harvard Medical School und der Mayo-Klinik – sahen seelische Gründe dafür. »Wir wissen, dass ein angstbedingter erhöhter Adrenalinspiegel das Herzflimmern verstärken kann«, sagte Charles Bethea, der am Integris Baptist Heart Hospital in Oklahoma City an der Studie teilnahm. »Vielleicht dachten die Patienten: ›Offenbar steht es so schlimm um mich, dass selbst nach Meinung der Ärzte nur noch Beten hilft.‹« Pater Dean Marek, ranghöchster Geistlicher an der Mayo-Klinik, sieht darin eine mögliche Schwachstelle der Untersuchung. »Es gab keine menschliche Verbundenheit. Ich würde das Beten eher unpersönlich als fürbittend nennen.«

Die Autoren der Studie wollten jedoch ausschließen, dass psychologische Effekte durch das Mitgefühl von Freunden und Angehörigen eine heilende Kraft ausüben, die sich nicht von der durch das Gebet unterscheiden ließe. Sie planen deshalb auch keine Folgeuntersuchung. Die vorliegende Studie, hauptsächlich finanziert von der konservativen, religiös geprägten John Templeton Foundation, hat 2 Millionen Euro gekostet.

Christine Soares ist Mitglied der Redaktion von Scientific American.

Springers
EINWÜRFE

von Michael Springer



Was hier steht, ist nicht wahr

Was halten Sie von diesem Satz, der von sich aussagt, dass er falsch sei? Wenn er, wie behauptet, nicht wahr ist, stimmt nicht, was er aussagt, und das bedeutet, dass er wahr ist – im Widerspruch zu dem, was er behauptet. Als Urform solcher sich selbst torpedierenden Aussagen gilt die Paradoxie des kretischen Priesters Epimenides, der alle Kreter als Lügner bezeichnete. Auch dies führt zu einer Antinomie: einem unauflöslichen Selbstwiderspruch.

Vor hundert Jahren, am 28. April 1906, wurde im heutigen Tschechien, damals Teil der österreichischen Monarchie, Kurt Gödel geboren, den die Fachwelt zu diesem Jubiläum als den größten Logiker seit Aristoteles feiert. Sein Ruhm beruht im Wesentlichen auf einem einzigen Theorem, dem Gödel'schen Unvollständigkeitssatz, der auf raffinierte Weise die Antinomie des Lügners nutzt.

Damit zeigte Gödel 1931, dass die damalige Erwartung, die gesamte Mathematik lasse sich nach dem Vorbild der Euklidischen Geometrie aus einigen Axiomen und Ableitungsregeln entwickeln, trügerisch war. In jedem formalen System, das es erlaubt, die Theoreme der Arithmetik herzuleiten, können systemsprengende Sätze von der Art des Lügnerparadoxons konstruiert werden, die sich weder beweisen noch widerlegen lassen.

Gödel selbst sah in seiner – für die Zeitgenossen völlig überraschenden – Entdeckung nichts Negatives, obwohl sie die Hoffnung, die Mathematik könne letztlich komplett auf Logik zurückgeführt werden, gründlich zerstörte. Hätte jene Hoffnung sich bewahrheitet, so gäbe es zumindest theoretisch ein Computerprogramm, das automatisch sämtliche Sätze der Mathematik zu produzieren vermöchte. Gödel hingegen meinte als überzeugter Anhänger der Platon'schen Ideenlehre, die Tätigkeit der Mathematiker gleiche der Entdeckungsreise in eine unbekannte Welt geistiger Objekte und nicht der freien Erfindung von Spielregeln, Formalismen und Rechenprogrammen. Dafür schien ihm sein Unvollständigkeitssatz ein klares Indiz (siehe »Kurt Gödel«, Spektrum-Biografie 1/2002).

Wie groß der denkerische Ehrgeiz des großen Logikers war, offenbaren erst Gödels postum edierte Notizen. Schon der Halbwüchsige betitelte ein Schulheft mit »Fehler der Bibel« – nicht einmal das Buch der Bücher war vor seinem kritischen Misstrauen sicher. In reifen Jahren arbeitete er an einem Beweis für die Existenz Gottes auf rein logischer Basis – nach dem Vorbild des mittelalterlichen Scholastikers Anselm von Canterbury. Gödels ontologischer Gottesbeweis geht kurz gesagt so: Gott ist nur denkbar als Wesen, das alle positiven Eigenschaften in sich vereint, und da Existenz eine solche positive Eigenschaft ist, muss Gott existieren. Was zu beweisen war.

In gewisser Weise erscheint mir dieses Argument als logische Umkehrung der Antinomie des Lügners. Der Satz »Ich bin falsch« sprengt die Konsistenz des Systems, in dem er formuliert wird; die Behauptung »Ich bin wahr« macht das Gegenteil: Eigenmächtig, kühn und herausfordernd stellt sie sich selbst im logischen Raum auf. Um dieser Behauptung blindlings zu vertrauen, ja sie als Selbstaussage des höchsten Wesens zu verstehen – etwa im Sinne des Jesu-Worts »Ich bin die Wahrheit und das Leben« –, dazu muss man freilich wie Gödel bedingungslos an die reale Existenz logisch-mathematischer Objekte glauben.

Orang-Utans
Klug dank Kultur

ALLE FOTOS (SOFERN NICHT ANDERS ANGEGEBEN): PERRY VAN DUIJNHOVEN, AUS: CAREL VAN SCHAIK, AMONG ORANGUTANS - RED APES AND THE RISE OF HUMAN CULTURE, HARVARD UNIVERSITY PRESS 2004, MIT FRDL. GEN. DES HARVARD COLLEGE

Verhaltensbeobachtungen an Menschenaffen auf Sumatra legen einen faszinierenden Schluss nahe: Eine Kultur mit starker Bereitschaft zum sozialen Lernen fördert die Entwicklung von Intelligenz.

In der Wildnis lernen Orang-Utan-Kinder intensiv von ihrer Mutter – nur in einer Population auf Sumatra nehmen sie oft auch andere Artgenossen zum Vorbild.

Von Carel van Schaik

Es bedeutet wohl keine übertriebene Eigenliebe, wenn wir Menschen behaupten, wir seien die klügsten Wesen dieser Erde. Manche Tiere verhalten sich in ihrer natürlichen Umwelt durchaus gescheit, aber eher selten befassen sie sich mit für sie neuen Aufgaben. Wenn sie das tun und neue Ideen hervorbringen, nennen wir ihr Verhalten intelligent.

Wie konnte die überragende menschliche Geisteskraft entstehen? Genauer gesagt, was förderte bei unseren Primatenvorfahren die Evolution eines hohen Verstandes? Vielleicht erlaubt die Beobachtung hochintelligenter Tiere Antworten hierzu. Deren Studium ist durchaus ein plausibler Weg, um herauszufinden, ob bei unseren Urahnen die gleichen formenden Kräfte am Werk waren wie bei anderen klugen Kreaturen. Auch einige Vögel und andere Nichtprimaten beweisen beim Problemlösen viel Pfiffigkeit, so die Papageien, Krähenvögel, Elefanten und Delfine. Vor allem aber die Erforschung der Großen Menschenaffen, unserer nächsten Verwandten, verspricht für diese Fragen Erkenntnisgewinn.

Es existieren bereits eine Reihe Erklärungsansätze zur Evolution der Intelligenz innerhalb der Primaten. Im Folgenden möchte ich eine neue Deutung vorstellen, auf die meine Kollegen und ich unerwartet stießen, als wir auf Sumatra wilde Orang-Utans beobachteten. Unseres Erachtens beantworten unsere Befunde die Frage nach dem Ursprung von Intelligenz recht weit gehend.

Große Bedeutung im Versuch, die Primatenintelligenz zu erklären, erlangte die These von der Machiavelli'schen Intelligenz. Gemeint ist damit, dass gewisse Affen ihr komplexes Sozialleben geschickt taktisch regeln – unter Umständen mit regelrechten »politischen« Manövern, die entfernt an Handlungen erinnern mögen, wie sie der italienische Politiker und Staatstheoretiker Niccolo Machiavelli (1469–1527) entwarf. Vertreter der These meinen, dass die Anforderungen vielschichtig verschlungener sozialer Strukturen Affen dazu anspornen, ausgeprägte kognitive Fertigkeiten zu entwickeln. Im sozialen Verband hat demnach der am meisten Erfolg – auch Fortpflanzungserfolg –, der die vorteilhaftesten Beziehungen zu unterhalten versteht. Derjenige bringt es zu etwas und kann seine Gene vererben, der eine soziale Situation schnell durchschaut und weiß, was zu tun jetzt für ihn selbst am besten ist. Demnach hätten die Anforderungen des Lebens in der Gemeinschaft die Intelligenzevolution vorangetrieben.

Geschick durch soziale Vorbilder

Für manche hoch entwickelten Primaten scheint das zumindest als ein Faktor in Betracht zu kommen. Fraglich ist aber, ob dieser Zusammenhang für alle Affen gleich wichtig ist – oder war – und ob er überhaupt für andere Tiergruppen zutrifft, das heißt, ob alle Tiere, die sich intelligent verhalten, in gleichem Maß zu politisch-taktischen Entscheidungen fähig sind. Denn viele andere Einflüsse auf eine Intelligenzevolution sind vorstellbar. Einer könnte die Nahrungsbeschaffung sein – sofern sie mühsam ist oder besonderes Geschick erfordert. Dann bringt es Vorteile, etwa schwierig zugängliche Bissen trickreich zu erhaschen oder sich zu merken, wo wann Früchte reifen. Auch das würde sich im Fortpflanzungserfolg auszahlen.

Ich biete eine weitere Erklärung an, die sich mit den geschilderten durchaus verträgt. Meine These hebt auf das Lernen von Fertigkeiten im sozialen Feld durch intensives Beobachten anderer bei einer Tätigkeit ab. Man könnte es Lernen über oder beim Sozialkontakt nennen. Auch im Leben eines Menschen bildet sich die Intelligenz erst nach und nach heraus. Ein Kind lernt vor allem unter geduldiger Führung Erwachsener, ▷

▷ aber natürlich zugleich aus eigenem Eifer. Ohne fortwährende soziale – also kulturelle – Anregung und Anleitung wird selbst aus einem möglichen Wunderkind ein Tölpel.

Primatologen erkennen mittlerweile, dass solches Lernen bei Sozialkontakten auch für die Großen Menschenaffen gilt. Wie ich zeigen werde, treffen im Tierreich Vorhandensein von Kultur und Intelligenz in der Regel zusammen. Arten mit Intelligenz haben auch eine Kultur. Das heißt, die Artgenossen übernehmen voneinander innovative Lösungen, wie man etwa mit ökologischen oder sozialen Anforderungen umgehen kann. Kurz gesagt: Kultur bringt Intelligenz voran.

Diese Ansicht erlangte ich auf einem Umweg – der mich in die Sümpfe Sumatras führte, genauer an die Westküste der indonesischen Insel. Dort nämlich beobachteten Kollegen und ich viele Jahre lang wilde Orang-Utans. Der rote »Waldmensch«, wissenschaftlich *Pongo pygmaeus*, ist der einzige asiatische Große Menschenaffe. (Siamang und Gibbons bezeichnen Systematiker als Kleine Menschenaffen.) Orang-Utans leben nur auf Borneo und Sumatra. Im Gegensatz zu ihren afrikanischen Vettern, Schimpansen, Bonobos und Gorillas, gelten sie als rechte Eigenbrötler und Einzelgänger. Sie geben sich viel stiller und zurückhaltender, neigen wenig zu Temperamentsausbrüchen und lebhaften sozialen Kontakten. Wohl kaum jemand hatte damit gerechnet, dass ausgerechnet diese verschlossene Menschenaffenart preisgeben würde, unter welchen Voraussetzungen Kultur aufblühen kann.

In das erwähnte Sumpfgebiet Sumatras zog es uns, weil dort auffallend viele Orang-Utans dicht beieinander leben. Anders als trockenere Urwälder Indonesiens erlaubt diese Region offenbar eine größere Bestandsdichte, denn die dortigen Torfmoorwälder bieten den Menschenaffen zu jeder Jahreszeit reichlich Nahrung. Wir arbeiteten im Kluet-Torfsumpf nahe dem Ort Suaq Balimbing (siehe Karte rechte Seite). Für Orang-Utans mag die Gegend ein Paradies sein. Für uns Forscher war sie die reinste Hölle, mit dem zähen Morast, den Wolken blutgieriger Insekten, immer bei drückenden, schwülheißen Temperaturen. Doch das Unterfangen lohnte.

Der Orang-Utan im linken Bild versucht ein Bienennest freizubeißen, um an den Honig zu kommen. Besser gelingt das den Affen von Suaq, denn sie machen sich dazu Stöckchen zurecht. Mit dem Stock zwischen den Zähnen (Pfeil im mittleren Bild) stochern sie dann vorsichtig im Bienenloch – und lecken die Süßigkeit genüsslich vom Stäbchen ab (ganz rechts).

Exklusive Werkzeugtradition

Schon eine unserer ersten Entdeckungen ließ uns staunen: Wir beobachteten, wie die Orangs für verschiedene Zwecke alle möglichen Werkzeuge anfertigten und geschickt damit hantierten. Dazu muss man wissen, dass diese Affen zwar in Gefangenschaft begeistert und sehr erfolgreich mit Geräten umgehen und sich auch selbst welche basteln, doch was den Werkzeuggebrauch ihrer wild lebenden Artgenossen betrifft, so ist vor allem dessen Nicht-Vorhandensein bezeichnend.

Ganz anders in der Population von Suaq. Als würden sie solche Artgebräuche nicht stören, fertigen die dortigen Tiere eifrig aus Zweigen einfache Instrumente. Diese benötigen sie insbesondere für zwei Zwecke. Zum einen angeln sie gern in Löchern und Ritzen von Baumstämmen nach leckeren Ameisen und Termiten, und noch lieber stochern sie in Bienennestern nach Honig – Letzteres übrigens vor allem bei stachellosen Bienen. Sie sind darauf viel mehr versessen als Artgenossen, die an anderen Orten erforscht wurden. Oft sieht man sie dabei, wie sie einen Baumstamm eingehend mustern. Entdecken sie Flugverkehr, suchen sie das Einflugloch. Das schauen sie sich zunächst gründlich an und beginnen dann mit dem Finger darin herumzupulen – meist mit wenig Erfolg, weil das Nest zu tief liegt.

Also beißt sich der Leckerfritz aus einem Zweig ein kleines Stocherinstrument zurecht. Dieses wird vorsichtig in das Loch gesteckt, ein wenig darin bewegt, wieder herausgezogen – und abgeleckt. Das kann sich viele Male wiederholen. Bemerkenswerterweise halten Orang-Utans das Stäbchen beim Stochern einfach zwischen den Zähnen (siehe Bilder oben). Die Hände nehmen sie nur bei großem Gerät zu Hilfe, etwa wenn sie einen Termitenbau aufschlagen.

Die zweite Art des Werkzeuggebrauchs zielt auf die offenbar besonders köstlichen, aber geradezu gemein verpackten Früchte des Neesia-Baums. In bis zu 25 Zentimeter langen, 10 Zentimeter dicken, sehr harten, holzigen Kapseln mit fünfeckigem Querschnitt stecken nahrhafte, gut bohnengroße, braune Samen, die zu fast 50 Prozent Fett

IN KÜRZE

▶ In einem Sumpfgebiet auf Sumatra beobachtete der Autor Carel van Schaik erstmals bei Orang-Utans **ausgiebigen Werkzeuggebrauch**. Weil Gleiches in den anderen bisher erforschten Populationen des roten Menschenaffen nicht vorkommt, könnte der Vergleich der Orang-Utan-Gruppen das alte Rätsel beantworten helfen, wieso in der Evolution bei manchen Tieren hohe Intelligenz entstand.

▶ Der Autor hält Kultur für den Schlüssel. Für Primatologen existiert Kultur, wenn sich Tiere **durch Beobachtung Fertigkeiten aneignen**, die andere Mitglieder der Population erfunden haben. In diesem Sinn kann Kultur, weil sich soziale Nähe lohnt, **beständig sich steigernde Fähigkeiten** erzeugen und so zunächst die Bereitschaft für Sozialkontakte und Lernen im sozialen Kontext bestärken und dabei auch die **Evolution von Intelligenz** vorantreiben.

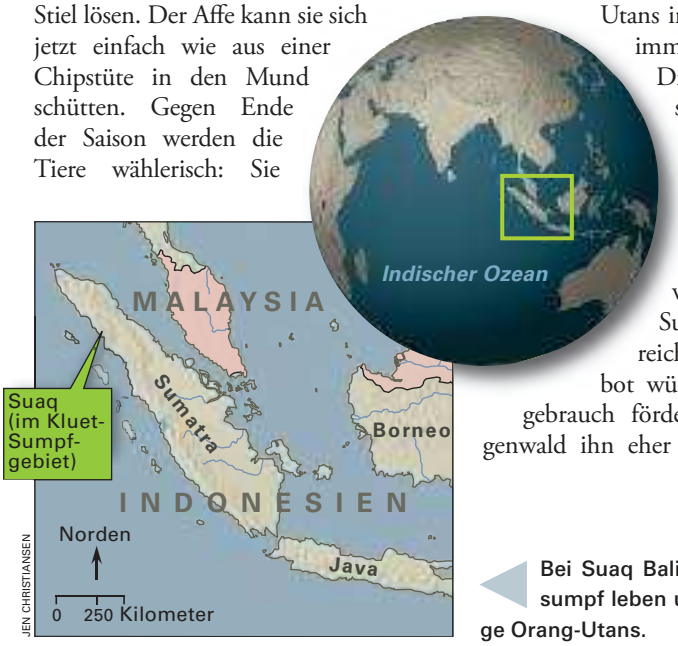
enthalten. Hochkalorisches gibt es im Urwald selten. Die Orangs lieben diese Kalorienbomben wie wir Menschen das Fast-Food. Das eigentliche Problem ist aber weniger, die feste Schale zu knacken. Zur Reife platzt die Hülle an einer Seite auf, die Ritze erweitert sich noch etwas, und in dem Spalt sieht man die Reihen von Samen mit ihren noch fetthaltigeren roten Samenmänteln daran. Nur kommt man an die Bohnen immer noch nicht heran, denn sie stecken tief in einem Verhau aus harten, rassiermesserscharfen Nadeln (siehe Bilder S. 30).

Was macht ein Orang-Utan? Er schält von einem kurzen, geraden Aststück die Rinde ab, nimmt es zwischen die Zähne und steckt es in den Spalt der Frucht. Nun fährt er mit dem Stöckchen darin hin und her, wobei sich die Samen vom Stiel lösen. Der Affe kann sie sich jetzt einfach wie aus einer Chipstüte in den Mund schütten. Gegen Ende der Saison werden die Tiere wählerisch: Sie nehmen jetzt nur noch die Samenmäntel, die sie auf ähnliche Weise herausholen.

Beide Arten des Werkzeuggebrauchs scheinen in Suaq Allgemeingut zu sein, Wir sahen sie in dieser Population oft und vielerorts. Während das Insektenangeln und Honigstochern eher gelegentlich vorkommt und meist nur ein paar Minuten dauert, können sich die Affen mit dem Auspulen von Neesia-Früchten stunden- und tagelang beschäftigen. Oft tun sie zu deren Erntezeit von morgens bis abends kaum etwas anderes. Wir konnten dann förmlich zusehen, wie sie jeden Tag runder wurden.

Warum benahmen sich die Affen unseres Studiengebiets so außergewöhnlich? Dass sie von Natur aus schlauer sind als ihre Artgenossen, ist zu bezweifeln. Schließlich erweisen sich Orang-Utans in Gefangenschaft fast immer als recht gelehrig. Die geistige Grundlage scheint ihnen allen gegeben.

Man ist geneigt, solche Unterschiede zwischen den Populationen den Umwelten zuzuschreiben. Sumpfwald mit seinem reicheren Nahrungsangebot würde dann Werkzeuggebrauch fördern, trockenerer Regenwald ihn eher verhindern. In dem morastigen Urwald gibt es einfach mehr Insektennester in Baumhöhlen, und der Neesia-Baum wächst nur an nassen Stellen, vorwiegend an Bächen oder Flüssen. Aber wieso gibt es etwas entfernt von Suaq ebenso nasse Gebiete, wo Orangs diese Frucht nicht fressen, obwohl der Baum dort wächst? Die Forscher kennen zudem Affenpopulationen, die diese vertrackten Früchte ohne Werkzeug verzehren – zwangsläufig dann viel seltener und weniger (siehe unten). Mit dem Stochern in Baumhöhlen ist das ähnlich.



Bei Suaq Balimbing im Kluet-Torfsumpf leben ungewöhnlich gesellige Orang-Utans.

Nicht alle sind gleich schlau

Übrigens suchen die Suaq-Affen auch manchmal nahe gelegene Hügel mit trockenerem Waldbestand auf, wenn dort gerade andere Sorten von Baumfrüchten mengenweise anfallen. Nicht selten beuten sie dann nebenbei auch dort Baumhöhlen in der beschriebenen Weise aus, was andere Orang-Populationen wie gesagt erst gar nicht versuchen. Vergleichbare Hügel gibt es so gut wie überall im Verbreitungsgebiet der roten Menschenaffen. Wenn die Orangs von Suaq dort mit maßgefertigten Stöcken werkeln können, warum tun das ihre Artgenossen in anderen Gebiete nicht auch?

Wir haben auch überlegt, ob – nach dem bekannten Sprichwort – Not die Tiere erfinderisch macht. Die Suaq-Orangs leben ja in vergleichsweise hoher Dichte. Vielleicht sind sie darum einer stärkeren Nahrungskonkurrenz ausgesetzt und müssen auch neue, eben schwerer zugängliche Quellen erschließen. Und für diese Nahrung benötigen sie eben Werkzeug, sonst müssten sie manchmal hungern. Gegen diese These ▷

▷ spricht vor allem, dass die Affen Süßes und Fettes über alles lieben. Gleich wo sie leben, nehmen sie für ein wenig Honig selbst einige Bienenstiche in Kauf.

Der Umgang mit Werkzeug ließe sich – gemäß unserer Deutung – aber auch so verstehen, dass einzelne besonders pfiffige Individuen innovative Techniken erfanden, welche andere Tiere dann beobachteten und nachahmten. Die Techniken bleiben im Verhaltensrepertoire der Population, weil die Nachgeborenen sie ihrerseits stets weitertragen. Das wäre Traditionsbildung, somit ein kulturelles Phänomen.

Sie zu beweisen, dürfte allerdings nicht leicht sein. Feldversuche mit diesen Tieren verbieten sich. Wir können zum Beispiel nicht unerfahrene Orangs aussetzen, um herauszufinden, wie leicht ein Affe neue Tricks nachahmt beziehungsweise direkt erfindet. Wir werden letztlich auch im Einzelfall nicht wissen, ob der Affe einen Kunstgriff schon kannte und nur selten benützt, oder ob er ihn sich gerade ausgedacht hat.

Unter Gefangenschaftsbedingungen ist das einfacher. Von dorther wissen wir, dass Orangs in hohem Maß Tätigkeiten anderer Individuen, auch von Menschen, beobachten und neue Handlungsweisen durch Abschauen erlernen. Trotzdem darf man solche Ergebnisse nicht auf Freilandsituationen übertragen. Denn sie lassen weder ermessen, in welchem Grad wilde Orangs überhaupt eine Kultur haben, noch was Kultur in dem Fall heißt. Uns Feldforschern bleibt nur, ein Kriteriensystem dafür aufzustellen, unter welchen Voraussetzungen einzelnen Verhaltensweisen ein kultureller Hintergrund zuzusprechen ist.

Eher einfache Kriterien für tradiertes Verhalten sind lokale Unterschiede in dessen Auftreten, denn das bewiese, dass es nicht zur genetischen Ausstattung der Art gehört, sondern erst irgendwann irgendwo erfunden und weitergegeben wurde. Leicht ist die Deutung auch, wenn das Verhalten dort, wo es denn vorkommt, praktisch Allgemeingut ist. Beide Voraussetzungen sind beim Werkzeuggebrauch in Suaq erfüllt. Zusätzlich muss man aber auch Erklärungen ausschließen, die kein durch Sozialkontakt stimuliertes Lernen fordern, vielmehr in der Regel einfachere Mechanismen zu Grunde legen. Diesbezüglich haben wir schon oben für unsere Fragestellung die These entkräftet, dass gleiche ökologische Randbedingungen gleiche Fertigkeiten hervorlocken. Ebenso dürfen wir genetische Unterschiede zwischen den Populationen als Erklärung ausschließen.

Grenzen für Bildung

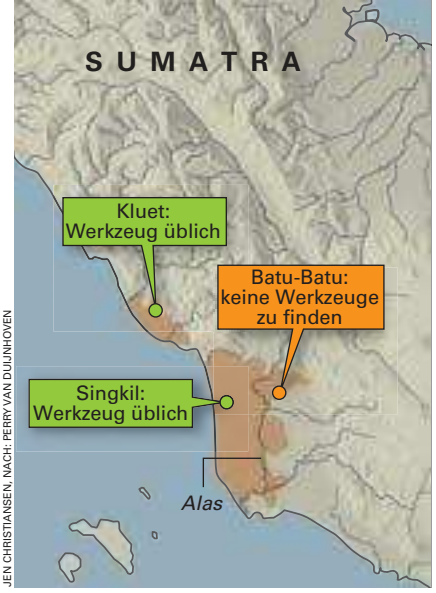
Das nächste Kriterium ist besonders aufschlussreich: Es müsste gelingen, von einem Verhalten Verbreitungsmuster nachzuweisen, die kulturell gut erklärbar wären, auf andere Weise aber kaum zu verstehen sind. Zum Beispiel wäre es interessant, wenn eine Fertigkeit nur auf einer Seite eines natürlichen Verbreitungshindernisses, bei sonst gleichen Lebensbedingungen, vorkommt – also einer geografischen Barriere, welche diese Tiere normalerweise nicht überbrücken können.

Genau solch einen Fall können wir aufzeigen. Ein wenig südlich von Suaq und dem vorn erwähnten Kluet-Feuchtgebiet dehnen sich die Singkil-Sümpfe aus. Diese sind nach Osten zu vom kleineren Batu-Batu-Sumpf durch den recht breiten, für Orangs unpassierbaren Fluss Alas getrennt, und auf beiden Seiten leben Orang-Utans (siehe Bilder rechts). Die Menschenaffen der Singkil-Population, auf derselben Flussseite wie Suaq, benutzen Stäbchen und Stöckchen in Massen. Gebrauchtes Werkzeug liegt dort praktisch überall mengenweise auf dem Boden herum. Solche Zeugnisse fehlen in Batu-Batu vollständig. Über Jahre haben wir dort danach gesucht – immer vergebens. Trotzdem verzehren die Affen dieses Gebiets Neesia-Früchte. Nur bedienen sich die Tiere dafür der gleichen, brutaleren Methode wie ihre Artgenossen auf Borneo in der Region Gunung Palung, die die harten Kapseln auseinander reißen. Dabei wäre die praktischere Technik so nah.

Batu-Batu ist ein eher kleines Feuchtgebiet, wo zudem nicht der üppigste Sumpfwald wächst. Entsprechend gering ist dort die Anzahl an roten Menschenaffen. Wir wissen nicht, ob diese Population den Werkzeuggebrauch nie erfand oder ob die Technik wegen der kleinen Individuenzahl nur wieder vergessen wurde. Sicher erscheint, dass solches Können nicht über den Alas-Fluss gekommen sein kann. Höchstens seinen Oberlauf könnten Orangs unter Umständen überqueren. Auch dort stehen noch vereinzelt Neesia-Bäume. Allerdings beachten die dort lebenden Affen die Früchte überhaupt nicht. Für diese Befunde liefert die These einer kulturellen Tradierung die plausibelste Erklärung.

Zu gern wollten wir wissen, warum nur die Suaq-Affen so gern und oft von technischen Hilfsmitteln Gebrauch machen. Ein genauer Vergleich aller bislang

Die großen Früchte des Neesia-Baums sind besonders fett und lecker. Aber sie sitzen in einer harten Schale und sind hinter Nadeln verschanzt (links). Mit einem entrindeten Zweig im Mund, mit dem er die Samen losstochert, löst ein Orang-Utan das Problem (rechts). In der Mitte eine eher kleine Frucht, in der noch das Werkzeug steckt.



JEN CHRISTIANSEN, NACH: PERRY VAN DUIJNHOVEN

Nur rechts des breiten Flusses Alas (Luftaufnahme) benutzen Orang-Utans Werkzeug, um die Neesia-Früchte zu fressen. Über den Fluss hat sich die Tradition nicht ausgebreitet. Stattdessen öffnen die Affen die harten Kapseln dort mit Gewalt.

untersuchten Orang-Utan-Populationen ergab zunächst, und das erscheint bemerkenswert: Die Orangs von Suaq haben auch sonst – von Werkzeug ganz abgesehen – mehr allgemein bei ihnen verbreitete Innovationen als die anderen Bestände, also irgendwann neu erworbenes Verhalten. Dieses Ergebnis scheint kein durch unser Interesse an ungewöhnlichen Phänomenen bedingtes Artefakt zu sein. An anderen Orten haben Forscher teilweise viel mehr Zeit damit zugebracht, kulturellen – im Sozialkontext vermittelten – Traditionen dieser Affen auf die Schliche zu kommen.

Es sah vielmehr so aus, als würden jene Populationen über die größere Vielfalt erlernter Fertigkeiten verfügen, deren Angehörige mehr Gelegenheit dazu haben, Artgenossen aus der Nähe zu beobachten. Und tatsächlich erwies eine genauere Recherche, dass Orang-Populationen, deren Mitglieder mehr Zeit miteinander zubringen, über mehr erlerntes Verhalten verfügen. Gleiches gilt übrigens für Schimpansen. Dieser Zusammenhang zeigt sich am deutlichsten rund um die Nahrungsaufnahme – was Sinn macht, muss man hierbei einem Artgenossen doch ganz dicht zuschauen können. Anders gesehen bedeutet dies, dass Tiere mit wenig Kontakt zu kundigen Artgenossen die geringste kulturelle Bandbreite entwickeln – wie der sprichwörtliche Bauerntrampel.

Beim Vergleich der einzelnen Orang-Populationen fiel uns noch etwas auf. Erwachsene Orangs, so hieß es bisher, streifen meistens allein durch den Wald. Nur die Kinder haben in den ersten vier bis fünf Jahren stets engen Kontakt mit der Mutter. Die jungen Affen lernen dabei viel Lebenswichtiges, denn eifrig machen sie ihrer Mutter alles nach. Suaq ist bisher das einzige Gebiet, wo auch erwachsene Tiere oft dicht beieinander fressen. Völlig ungewöhnlich für diesen Menschenaffen, machen sich mehrere Tiere sogar regelmäßig über dieselbe Futterquelle her, meist über Termiten in Ästen. Sie teilen miteinander sogar Nahrung, wie manchmal einen erbeuteten Lori, einen langsamen, am Tag schläfrigen Halbaffen. Wo die Tiere so viel Nähe tolerieren, können die weniger Kenntnisreichen unter ihnen den versierteren Artgenossen nahe genug kommen, um ihnen genau zuzusehen. Das tun sie denn auch höchst interessiert.

Für intellektuell anspruchsvollere Neuerungen, die sich vermutlich nur durch wiederholtes Beobachten und Üben lernen lassen, ergibt sich etwas Überraschendes: Dergleichen dürfte sich in einer Population leichter erhalten, sofern neben der Mutter andere Vorbilder zur Verfügung stehen. Andernfalls hätte der Nachwuchs von Weibchen, die nicht besonders helle sind, wenig Chancen. Je geselliger die Tiere sind, umso eher bleiben Innovation nicht nur über Generationen bestehen, sondern desto mehr davon existieren überhaupt – ein wichtiger Aspekt. Unsere Freilandbeobachtungen lassen annehmen, dass bei wilden Tieren, mindestens aber bei Primaten, wohl meistens eine soziale Komponente mitspielt, wenn sie etwas lernen – ausgenommen etwa einfache Konditionierungen.

Diesen Faktor berücksichtigen Lernexperimente im Labor wenig. Sie zielen vielmehr oft darauf ab herauszufinden, wie klug und findig ein Tier von allein ist. Im Freiland würden die meisten solchen Studien vermutlich kläglich scheitern – hauptsächlich weil die Tiere erst gar nicht merken würden, dass es ein Problem zu lösen gilt. Um sie herum gibt es stets gerade genug Wichtiges, das ihre volle Aufmerksamkeit fordert. Von Bedeutung sind immer auch die Artgenossen. Die beachtet man stets genauestens – und beobachtet, was sie gerade tun.

Intelligent durch Sozialkontakt

Was bedeutet das alles für die Intelligenzevolution? Besitzt eine soziale Gemeinschaft Kultur, fördert das nicht einfach nur unmittelbar die Intelligenz von Individuen, sondern es begünstigt langfristig auch die Höherentwicklung des Verstands. Zunächst: Dass die individuelle Schlauheit von sozialen Kontakten profitiert – was Erkenntnisse aus der Wildnis stark erahnen lassen –, bestätigen Laborversuche, ungeachtet dessen, wie verschieden die Lernmechanismen bei den Arten sein mögen. Ob Orangs, Schimpansen oder Gorillas – eignen sie sich eine intellektuell anspruchsvolle Handlung an, spielen Lernen durch Abschauen und viel ▷

▷ Üben zusammen, ganz wie bei Menschenkindern. Die Orangs von Suaq sind darin besser als andere, weil sich ihnen lebenslang mehr solche Lerngelegenheiten bieten. Somit hebt der soziale Faktor den Intellekt auf eine höhere Ebene.

Um zu veranschaulichen, wie das in die Evolution einfließt, nun ein Gedankenexperiment. Zunächst stelle man sich ein Tier vor, dessen Junge allein, ohne sozialen Kontakt aufwachsen. Irgendwann könnte ein Weibchen dieser Art eine nützliche Erfindung machen – sagen wir, es entdeckt, wie man große, fette Nüsse knackt. Nun hat es besseres Futter zur Verfügung als alle anderen und vielleicht deswegen mehr Nachkommen. Aber in der nächsten Generation wäre der Trick wieder vergessen.

Kulturell überqualifiziert in Menschenobhut

Im nächsten Schritt blieben Kinder einige Zeit bei der Mutter. Später ginge jedes seiner Wege. Wir denken an ein Tier, dessen Junge langsam heranwachsen, somit eine recht lange Zeit mit ihrer Mutter zusammen sind. Nun würden die meisten Kinder des erfinderischen Weibchens wohl den Trick mit den Nüssen lernen, und sie dürften ihn ihrerseits an die nächste Generation weitergeben. Wegen des individuellen Vorteils solchen Könnens bliebe die Kenntnis davon recht wahrscheinlich in der Familienlinie erhalten. Die Gewähr für den Verbleib – und die Verbreitung des Verhaltens – stiege allerdings beträchtlich, wenn auch noch ein Gruppenleben aufkäme. Solche Gruppen müssen nicht einmal groß sein.

Nun kommt der entscheidende Schritt: Kraft der natürlichen Selektion würden winzige Fortschritte in der Begabung abzugucken etwas stärker belohnt als vergleichbar kleine Begabungssteigerungen darin, Neues zu erfinden. Der Grund ist, dass so die Kompetenzen der eigenen und früherer Generationen zusammen veranschlagt werden. Tiere, die sich auf beides zu stützen vermögen, haben einen Vorteil. Somit würden sich beide Arten von Begabung gegenseitig hochschaukeln – der Intellekt, der Erfindungsgabe erlaubt, hinge sozusagen im Schlepptau der steigenden Bereitschaft, von anderen zu lernen. Wenn Tiere mit ein wenig innovativem Talent eine Kultur ausbilden, haben sie die Vorraussetzungen, sich zu höherer Intelligenz hin weiterzuentwickeln.

Unsere Hypothese erhellt ein anderes bisher rätselhaftes Phänomen. In vergangenen Jahrzehnten haben Leute verschiedentlich Menschenaffenbabys fast wie eigene Kinder in der Familie aufgezogen. Diese Tiere lernten erstaunlich viel von unserer Kultur. So manches komplexe, intellektuell anspruchsvolle Verhalten eigneten sie sich mühelos an. Sie verstanden beispielsweise, was Zeigen mit dem Finger heißt, und sie lernten wohl auch teilweise Gesprochenes verstehen. Sie malten »abstrakte« Bilder und amüsierten sich köstlich mit Unsinnmachen. Gezielter Unterricht an Symbolen offenbarte sogar verblüffende sprachliche Grundfähigkeiten.

Auch wenn vielen dieser Studien methodische Mängel angekreidet werden, so zeigen die Berichte doch allein schon in ihrer Zahl, welches Potenzial in den Menschenaffen schlummert. Vielleicht unterschätze ich, was der Urwald einem Menschenaffen alles abverlangt – doch ich vermute, dass von Menschen aufgezogene Schimpansen, Orangs oder Gorillas regelrecht überqualifiziert für ihre Art sind. Wird so einem Tier, übertrieben gesagt, quasi eine Essenz der geballten menschlichen Kulturgeschichte aufgebürdet, katapultiert das den Affen in kognitive Höhen, die keiner seiner wild lebenden Artgenossen erreicht.

Ähnlich erklärt sich vielleicht, wieso eine Reihe von Primatenarten in Gefangenschaft so gern Werkzeuge benutzt oder teilweise sogar herstellt, während ihre Artgenossen in der Wildnis offenbar den Drang dazu nicht verspüren. Es hieß früher, jene Affen würden die Hilfsmittel eben nicht benötigen. Das scheint aber zu kurz gedacht, verhilft doch manches Werkzeug gerade zu besonders hochwertigem Futter beziehungsweise zu Nahrung in karger Zeit. Der Widerspruch löst sich auf, wenn man dem sozialen Umfeld so viel Einfluss zugesteht, dass es bei derselben Art im einen Fall mehr zu geistigen Leistungen anregt, im anderen weniger.

Verstecktes Talent

Orang-Utans sind dafür ein Paradebeispiel. Sie gelten unter Zooleuten als wahre Ausbruchskünstler, vor denen kein Schloss sicher ist. In der Wildnis fanden Forscher jahrzehntelang wenig nennenswerten Technikgebrauch, erst Suaq bildet die Ausnahme. Wildfänge gewöhnen sich kaum je ans Eingesperrtsein. Die tiefe Scheu und der Argwohn gegenüber Menschen bleiben. Dagegen nehmen im Zoo geborene Orangs die Pfleger begeistert zum Vorbild für alle möglichen Betätigungen. Sie passen genau auf, was diese tun, und prüfen herumliegende Gegenstände akribisch. Weil sie so immerfort lernen zu lernen, eignen sie sich mit der Zeit eine Menge Fertigkeiten an.

Nach unserer Theorie – und das ist ein Kernaspekt – sollten sich die intelligentesten Tiere, aus welcher systematischen Verwandtschaft auch immer, dort finden, wo möglichst die gesamte Gemeinschaft Neuerfindungen übernimmt. Diese These ist schwierig zu prüfen. Sinne und Lebensweise der klugen Tierarten sind so verschieden, dass es schwer fällt, sie nach gleichem Maß zu messen. Bisher können wir nur nachschauen, ob eine unbestreitbar intelligente Art eine innovative (auf Innovation gründende) Kultur besitzt – und umgekehrt.

Beispielsweise gilt das Vermögen, sich selbst im Spiegel zu erkennen, als sicheres, wenn auch unzureichend verstandenes Indiz für ein Selbstbewusstsein und

HERMAN D. RIJKSEN, AUS: CAREL VAN SCHAIK, AMONG ORANGUTANS, HARVARD UNIVERSITY PRESS 2004

Die Orang-Utans in den Sumpfwäldern an der Westküste Sumatras sind ungewöhnlich gesellig. Halbwüchsige Tiere suchen so oft wie möglich den Kontakt.

damit als ein Zeichen hoher Intelligenz. Den Spiegeltest bestanden bisher bei den Säugern nur Große Menschenaffen und Delfine – jene Arten, die im Stande sind, eine größere Anzahl willkürlicher Symbole zu erlernen. Sie können auch besonders gut imitieren, besitzen damit eine wichtige Grundvoraussetzung für eine innovative Kultur. Dagegen ist ein anderer Ausdruck von Intelligenz, erfinderischer Werkzeuggebrauch, bei Säugetieren weiter verbreitet. Er kommt etwa bei anderen Affen und bei Elefanten vor – mithin bei Tieren, die üblicherweise bei Sozialkontakten viel lernen.

Wie erwähnt, müssten sich die Begabungen für innovatives Verhalten und Lernen im sozialen Feld in der Evolution miteinander herausgebildet haben. Dafür sprechen in der Tat Befunde von Simon Reader, heute an der Universität Utrecht, und Kevin N. Laland von der Universität St. Andrews (Schottland). Demnach zeichnen sich die erfinderischsten Primatenspezies durch besonders viel Lernen über Sozialkontakt aus, was ein Hinweis auf einen Evolutionszusammenhang sein könnte. Auch Korrelationen mit der Hirngröße sind dafür zwar kein direkter Beweis, aber immerhin haben in den systematischen Säugetiergruppen die geselligsten Arten die relativ größten Gehirne.

Zwar vermag unser Ansatz allein nicht zu erklären, warum sich von allen Menschenaffen einzig unsere Vorfahren zu einer derart herausragenden Intelligenz aufschwangen. Aber die Kluft zwischen uns und diesen anderen Primaten wirkt doch nicht mehr ganz so breit, sieht man, welches geistige Potenzial bei ihnen zu Tage tritt. Wie es geschehen konnte, dass wir uns von ihnen so deutlich abgrenzen, klärt sich aus den wenigen fossilen und archäologischen Zeugnissen der Menschheitsgeschichte nur mühsam. Für die Wende halten viele Forscher die Phase, als das Leben unserer Vorfahren als aufrecht gehende Werkzeugmacher in der Savanne begann. Zusammenarbeit war erforderlich, wollten sie dort große Knollen ausgraben und größere Beutetiere zerlegen, die ihnen Raubtiere streitig machten. Sie mussten strategisch planen und sich nützliche Geräte ausdenken. Der Zwang dazu begünstigte immer mehr Neuerungen und immer mehr gegenseitige Abhängigkeit. Die Intelligenz schwoll nun gewaltig an.

Nachdem der Mensch einmal da war, trat die Kulturentwicklung in Wechselwirkung mit einer Veranlagung zur Leistungsverbesserung. Fast 15000 Jahre dauerte es nach dem Erscheinen unserer eigenen Art, bis Zeugnisse symbolischen Denkens üblich wurden, ob Kunstwerke, Musikinstrumente oder Grabbeigaben (siehe »Frühe Spuren des menschlichen Geistes«, Spektrum der Wissenschaft 12/2005, S. 38). Die technische Explosion in den letzten zehntausend Jahren zeigt, welch grenzenlose Fähigkeiten kulturelle Umwelten hervorbringen können, und das alles bei Steinzeitgehirnen. Kultur vermag in der Tat neuen Verstand in ein altes Gehirn zu pflanzen. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Carel van Schaik ist Direktor des Anthropologischen Instituts und Museums der Universität Zürich. Er stammt aus den Niederlanden und war bis 2004 Professor für biologische Anthropologie an der Duke-Universität in Durham, North Carolina.

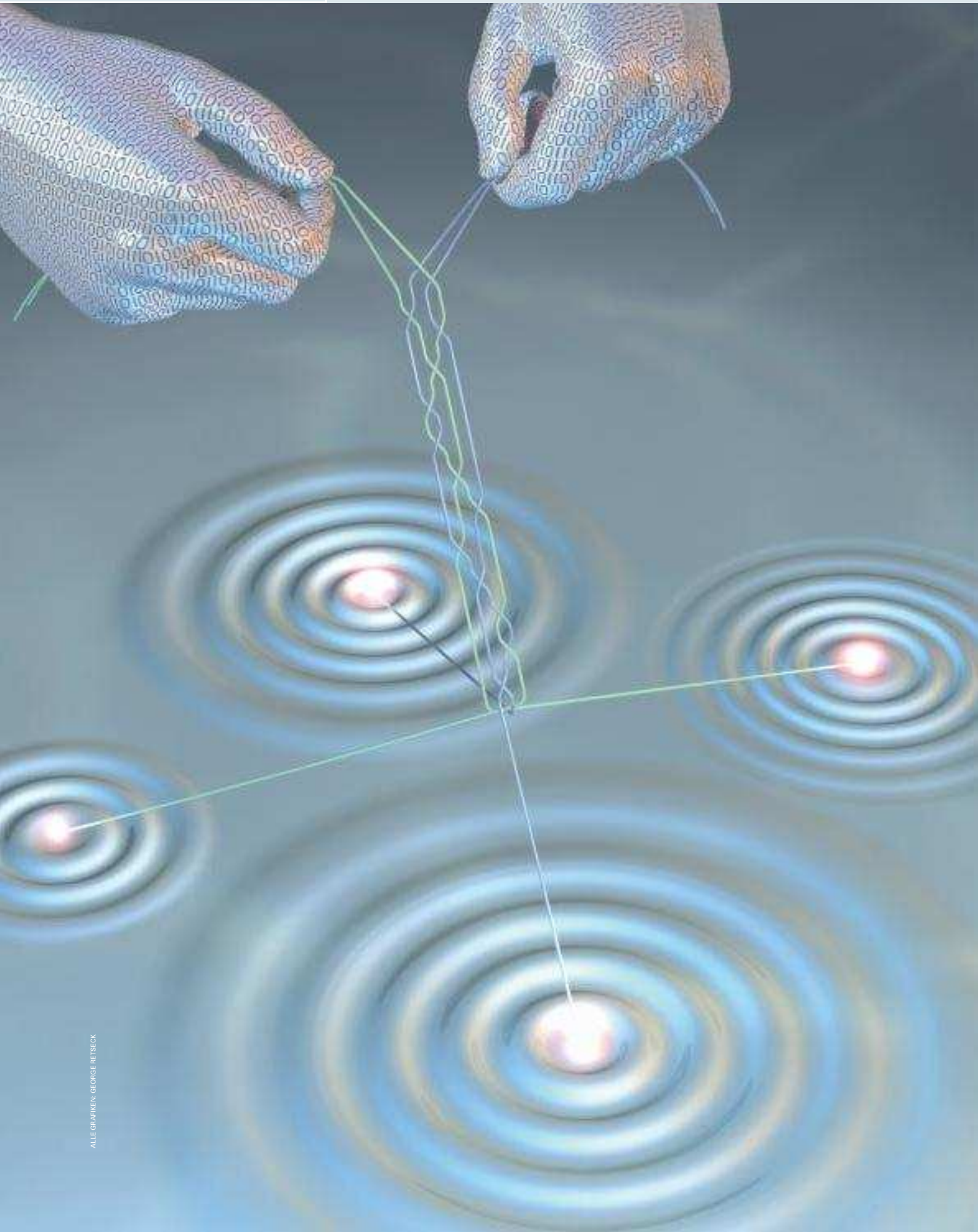
Conformity to cultural norms of tool use in chimpanzees. Von Andrew Whiten et al. in: Nature, Bd. 437, S. 737, 29. Sept. 2005

Among orangutans: Red apes and the rise of human culture. Von Carel van Schaik. Harvard University Press, 2004

A model for tool-use tradition in primates: Implications for the coevolution of culture and cognition. Von C. P. van Schaik und G. R. Pradhan in: Journal of Human Evolution, Bd. 44, S. 645, 2003

Orangutan cultures and the evolution of material culture. Von C. P. van Schaik et al. in: Science, Bd. 299, S. 102, 3. Jan. 2003

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.



ALLE GRAFIKEN: GEORGE RETSECK

TITEL

Quantenknoten in der Raumzeit

Aus den Bahnen bizarrer Quasiteilchen, so genannter Anyonen, lassen sich Knotenstränge in der Raumzeit flechten. Eine Maschine, die mit solchen Quantenzöpfen operiert, weist vielleicht den kürzesten Weg zum Quantencomputer.

Von Graham P. Collins

Künftige Quantencomputer sollen eines Tages Aufgaben bewältigen, an denen gewöhnliche Elektronenrechner scheitern. Das hätte weit reichende Konsequenzen. Zum Beispiel könnte ein Computer, der riesige Zahlen hurtig in Faktoren zu zerlegen vermag, gewisse gängige Datenschlüssel knacken. Praktisch alle Verschlüsselungsmethoden, die zum Schutz geheimer Daten verwendet werden, sind durch den einen oder anderen Quantenalgorithmus gefährdet.

Die überragende Rechenkraft des Quantencomputers rührt daher, dass er nicht gewöhnliche Bits verarbeitet, sondern Quantenbits, kurz Qubits. Herkömmliche klassische Bits nehmen nur die Werte null oder eins an, und auf diesem strengen Entweder-oder beruht die Architektur üblicher Mikrochips. Ein Qubit nimmt hingegen einen so genannten Superpositionszustand ein, der unterschiedliche Anteile von null und eins enthält. Man kann sich die möglichen Zustände eines Qubits als Punkte auf einer Kugelfläche vorstellen: Der Nordpol entspricht dem klassischen Wert eins, der Südpol der Null, und alle Punkte dazwischen sind mögliche Überlagerungen von 0 und 1 (siehe »Spielregeln für Quantencomputer« von Michael A. Nielsen, Spektrum der Wissenschaft 4/2003, S. 48). Dass den Qubits die gesamte Kugel zur Verfügung steht, verleiht Quantencomputern ihre einzigartigen Fähigkeiten.

Leider erweist es sich als extrem schwierig, solche Quantencomputer zu bauen. Meist werden die Qubits durch bestimmte Quanteneigenschaften von eingesperrten Teilchen repräsentiert – von einzelnen Ionen oder Elektronen. Doch deren Superpositionen sind ungemein empfindlich und zerfallen schon durch winzigste Wechselwirkungen mit ihrer Umgebung, zu der auch das gesamte Baumaterial des Computers gehört. Wenn die Qubits nicht sorgfältig von ihrer gesamten Umwelt isoliert werden, erzeugen solche Störungen unweigerlich Rechenfehler.

Darum konzentrieren sich die Pläne für Quantencomputer darauf, die Wechselwirkung der Qubits mit der Umgebung möglichst klein zu halten. Die Forscher müssen die Fehlerrate auf einen Fehler pro zehntausend Rechenschritte reduzieren, damit Korrekturverfahren den Zerfall einzelner Qubits zu kompensieren vermögen. Die Physiker sind aber noch längst nicht im Stande, eine Maschine zu bauen, in der die meisten Qubits so gut isoliert sind, dass die Fehlerrate derart niedrig bleibt.

Einige Forscher schlagen einen ganz anderen Weg ein. Bei ihrem Ansatz hängen die empfindlichen Quantenzustände von den topologischen Eigenschaften eines physikalischen Systems ab. Die Topologie untersucht mathematische Eigenschaften, die sich nicht ändern, wenn ein Objekt kontinuierlich verformt wird; das heißt, es darf gestreckt, gequetscht und verbogen werden, nicht aber zerschnitten oder verbunden. Ein Teilgebiet ist die Knotentheorie. Kleine Störungen verändern eine topologische Eigenschaft nicht. Zum Beispiel ist eine geschlossene ▷

Durch geordnetes Verflechten der Weltlinien, die höchst spezielle »Teilchen« in der Raumzeit beschreiben, lassen sich Quantenberechnungen durchführen, die kein klassischer Computer zu Wege bringt. Die exotischen Quasiteilchen, aus deren Bahnen Zöpfe geflochten werden, existieren nur als Anregungszustände in einem zweidimensionalen Elektronengas.

▷ Schleife, die einen Knoten enthält, topologisch verschieden von einer Schleife ohne Knoten (siehe den Kasten rechts). Die einzige Möglichkeit, die knotenlose Schleife in eine mit Knoten zu verwandeln, ist, sie zu zerschneiden, den Knoten zu knüpfen und dann die losen Enden wieder zu verbinden. Ebenso kann ein topologisches Qubit nur gewaltsam in einen anderen Zustand versetzt werden. Kleine Anstöße aus der Umgebung reichen dafür nicht aus.

Auf den ersten Blick sieht ein topologischer Quantencomputer überhaupt nicht wie eine Rechenmaschine aus. Er arbeitet mit verflochtenen Fäden – aber nicht mit materiellen Fäden im herkömmlichen Sinn. Vielmehr handelt es sich hier um so genannte Weltlinien: die Bahnen von Teilchen, die sich durch Raum und Zeit bewegen. Die Länge eines Fadens stellt die Bewegung eines Teilchens durch die Zeit dar, die Fadendicke die Größe des Teilchens.

Partikel, die es nur »quasi« gibt

Außerdem sind die Teilchen in diesem Fall nicht Elektronen oder Protonen, wie man zunächst vermuten könnte, sondern Quasiteilchen – Anregungen in einem zweidimensionalen elektronischen System, die sich sehr ähnlich verhalten wie die Teilchen und Antiteilchen der Hochenergiephysik. Ein spezieller Typ solcher Quasiteilchen heißt Anyonen, und sie haben die gewünschten mathematischen Eigenschaften.

Eine Berechnung könnte folgendermaßen ablaufen. Zuerst nehmen wir Anyonenpaare und platzieren sie nebeneinander in einer Reihe (siehe Kasten auf S. 38). Jedes Anyonenpaar gleicht einem Teilchen und seinem Antiteilchen, die paarweise aus purer Energie erzeugt wurden.

Anschließend vertauschen wir benachbarte Anyonen in einer genau festgelegten Weise. Die Weltlinie jedes Anyons bildet einen Faden, und die Bewegungen der Anyonen beim Vertauschen erzeugen eine Verflechtung aller Fäden – einen Zopf. In diesem speziellen Zopfgeflecht ist die Quantenberechnung enthalten. Die Endzustände der Anyonen, die das Resultat der Berechnung verkörpern, werden nur durch den Zopf bestimmt und nicht durch elektrische oder magnetische Streufelder beeinflusst. Weil der Zopf topologisch ist – wenn man die Fäden ein wenig hin und her versetzt, ändert sich ihre Verflechtung nicht –, machen ihm äußere Störungen prinzipiell nichts aus. Die Idee, Anyonen in dieser Weise für Berechnungen zu verwenden, entwickelte Alexei Y. Kitaev, der heute für die Firma Microsoft forscht, im Jahr 1997.

Michael H. Freedman, heute ebenfalls bei Microsoft tätig, hielt bereits im Herbst 1988 Vorlesungen an der Harvard-Universität über die Möglichkeit, Quantentopologie für Berechnungen zu nutzen. Dem Gedanken, den er erst 1998 in einem Forschungsartikel publizierte, lag die Entdeckung zu Grunde, dass bestimmte mathematische Größen, so genannte Knoteninvarianten, mit der Quantenphysik einer zweidimensionalen Fläche zusammenhängen, wenn deren zeitliche Entwicklung betrachtet wird. Wenn ein solches physikalisches System realisiert und gemessen werden könnte, würde die Knoteninvariante fast exakt berechnet – und zwar automatisch statt über eine umständliche Berechnung auf einem herkömmlichen Computer. Für gleich schwierige, aber praktisch relevantere Probleme gäbe es ähnliche Abkürzungen.

All dies mutet zunächst wie verstiegene, realitätsferne Theorie an, doch kürzlich haben Experimente mit dem fraktionierten Quanten-Hall-Effekt das Anyonen-Konzept auf eine solidere Basis gestellt. Weitere Experimente sind geplant, um erste Vorformen eines topologischen Quantencomputers zu erproben.

Wenn Quantenteilchen Plätze tauschen

Ein topologischer Quantencomputer verflicht Weltlinien, indem er Teilchenpositionen austauscht. Das Verhalten der Teilchen beim Austausch unterliegt den Gesetzen der Quantenphysik und unterscheidet sich grundlegend von klassischen Tauschprozessen. Wenn man in der klassischen Physik zwei Elektronen, die an den Orten A und B sitzen, vertauscht, ist der Endzustand identisch mit dem Anfangszustand. Da die Elektronen ununterscheidbar sind, gilt dies auch für Anfangs- und Endzustand. Doch in der Quantenmechanik ist der Tauschvorgang komplizierter.

Das kommt daher, dass der Zustand eines Quantenteilchens durch die so genannte Wellenfunktion beschrieben wird. Sie enthält alle Eigenschaften des Teilchens – die Wahrscheinlichkeit, es an unterschiedlichen Orten zu finden, die Wahrscheinlichkeit, an ihm diese oder jene Geschwindigkeit zu messen, und so fort. Beispielsweise ist ein Teilchen am ehesten dort zu finden, wo die Wellenfunktion die größte Amplitude hat.

Ein Elektronenpaar wird durch eine gemeinsame Wellenfunktion beschrieben, und wenn die beiden Elektronen vertauscht werden, wechselt sie das Vorzeichen. Dadurch verwandeln sich Wellenberge in Wellentäler und umgekehrt, aber das hat auf die Amplitude keine Auswirkung. Tatsächlich wird keine messbare Eigenschaft der zwei Elektronen selbst verändert.

Doch die Vertauschung verändert die Art, wie die Elektronen mit anderen Elektronen interferieren. Interferenz entsteht, wenn zwei Wellen einander überlagern. Dort, wo Wellenberg auf Wellenberg trifft, entsteht durch konstruktive Interferenz eine hohe Amplitude, während beim Zusammentreffen von Wellenberg und Wellental destruktive Inter-

IN KÜRZE

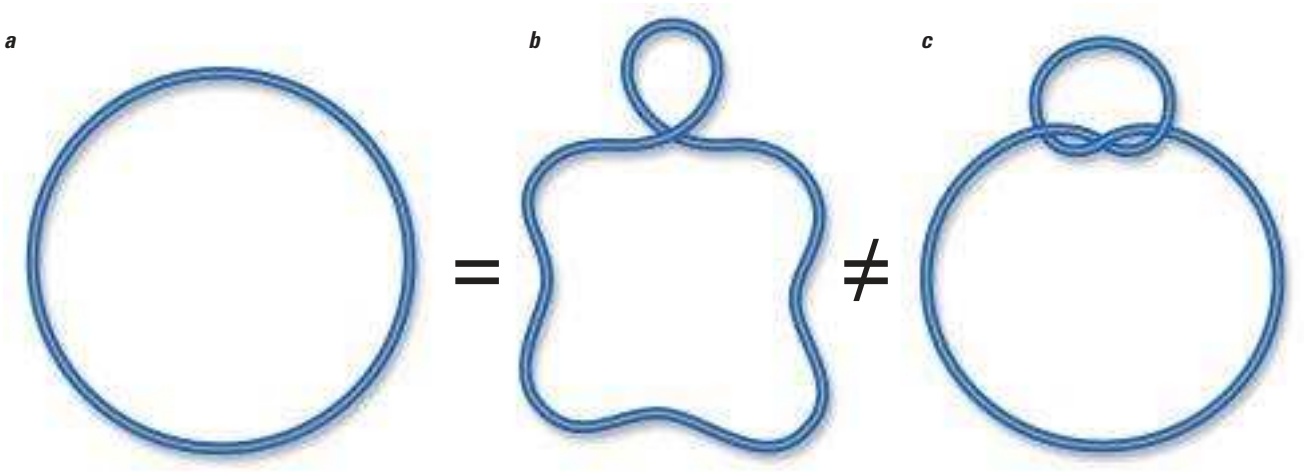
▶ **Quantencomputer** könnten im Prinzip die Fähigkeiten klassischer Computer bei Weitem übertreffen, doch damit sie überhaupt funktionieren, müssen sie eine sehr niedrige Fehlerquote aufweisen. Mit herkömmlicher Technik lässt sich dies nicht erreichen.

▶ **Topologische Quantencomputer** beruhen auf einem radikal neuartigen Prinzip. Da topologische Eigenschaften durch kleine Störungen nicht verändert werden, wären solche Computer kaum anfällig für unerwünschte Wechselwirkungen mit der Umgebung.

▶ Topologische Quantencomputer nutzen so genannte **Anyonen** – theoretisch postulierte Anregungszustände, die sich wie Teilchen in einer zweidimensionalen Welt verhalten. Anyonen lassen sich nur in speziellen Halbleiter-Grenzschichten erzeugen, wenn diese auf Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt abgekühlt und starken Magnetfeldern ausgesetzt werden.

Die Topologie von Schleifen und Knoten

Die Topologie einer geschlossenen Schleife (*a*) bleibt unverändert, wenn der Faden bloß eine andere Form annimmt, ohne aufgeschnitten und neu geklebt zu werden (*b*). Hingegen ist eine geschlossene Schleife mit eingeknüpftem Knoten davon topologisch verschieden (*c*). Ein Knoten lässt sich nicht durch bloße Formveränderung der Schlinge erzeugen; man muss den Faden durchschneiden, einen Knoten knüpfen und die losen Enden wieder zusammenkleben. Darum ist die Topologie der Schleife unempfindlich gegen Störungen, solange diese nur den Faden hin und her schieben.



ferenz eintritt und eine niedrige Amplitude bewirkt. Wird nun bei einer der Wellen das Vorzeichen umgekehrt, kehren sich auch ihre Berge und Täler um – und an Stellen, wo vorher konstruktive Interferenz die resultierende Welle verstärkte, herrscht jetzt destruktive Interferenz, also Auslöschung.

Die Vorzeichenumkehr bei Vertauschung gilt nicht nur für Elektronen, sondern auch für Protonen, Neutronen und andere Teilchen aus der Klasse der so genannten Fermionen. Die andere große Teilchenklasse umfasst die Bosonen: Deren Wellenfunktion bleibt unverändert, wenn man zwei Teilchen vertauscht. Man könnte auch sagen, beim Vertauschen von Fermionen wird die Wellenfunktion mit dem Faktor minus eins multipiziert, bei Bosonen mit plus eins.

Aus tief liegenden mathematischen Gründen müssen Quantenpartikel in drei Dimensionen entweder Fermionen oder Bosonen sein. Doch in zwei Dimensionen ist als Vertauschungsfaktor auch eine komplexe Phase erlaubt, die man sich als Winkel in der komplexen Ebene vorstellen kann. Null Grad entspricht der Zahl Eins, 180 Grad ergeben minus eins. Die Winkel dazwischen sind komplexe Zahlen. Zum Beispiel ergeben 90 Grad die Zahl i, die Quadratwurzel aus minus eins. Wie beim Faktor minus eins hat auch das Multiplizieren mit einer komplexen Phase keinerlei Einfluss auf die messbaren Eigenschaften des einzelnen Teilchens, denn dafür sind nur die Amplituden ausschlaggebend. Hingegen hat die Phase durchaus einen Einfluss darauf, wie zwei komplexe Wellen interferieren.

Teilchen, die beim Vertauschen eine komplexe Phase annehmen, werden Anyonen genannt, weil irgendeine (englisch *any*) komplexe Phase auftreten kann, nicht nur eine Phase von plus oder minus eins. Teilchen eines bestimmten Typs nehmen jedoch immer dieselbe Phase an.

Elektronen im Flachland

Anyonen existieren nur in einer zweidimensionalen Welt. Wie können wir Paare davon für topologische Computer erzeugen, wo wir doch in drei Dimensionen leben? Die Antwort liegt im »Flachland« der Quasipartikel. Zwei Halbleiterscheiben aus Galliumarsenid lassen sich mit großer Sorgfalt so bearbeiten, dass in der Übergangsschicht ein »Gas« aus Elektronen entsteht, die sich nur in den zwei Dimensionen des Zwischenbereichs frei bewegen, während ihnen die dritte Dimension verwehrt ist. Physiker haben solche zweidimensionalen Elektronengase intensiv studiert – denn bei extrem niedrigen Temperaturen treten höchst ungewöhnliche Quanteneffekte auf, wenn senkrecht zur Grenzfläche starke Magnetfelder einwirken.

Zum Beispiel verhalten sich Anregungen des Elektronengases beim fraktionierten Quanten-Hall-Effekt wie Partikel, die einen bestimmten Bruchteil der Elektronenladung tragen. Andere Anregungen führen Einheiten des magnetischen Flusses mit sich, als wäre er eine Teilcheneigenschaft. 2005 behaupteten Vladimir J. Goldman, Fernando E. Camino und Wei Zhou von der Stony-Brook-Universität, sie hätten experimentell bewiesen, dass die beim fraktionierten Hall-Effekt entstehenden Quasipartikel Anyonen seien. Das wäre ein wichtiger erster Schritt zum topologischen Quantencomputer. Andere Forscher suchen aber weiter nach unabhängigen Indizien dafür, dass die Quasipartikel sich wie Anyonen verhalten, denn möglicherweise wurden die Ergebnisse von Goldman und seinen Kollegen nicht durch Quanteneffekte hervorgerufen.

In zwei Dimensionen tritt beim Vertauschen zweier Teilchen ein wichtiger Unterschied auf: Wandern die Teilchen beim Austausch im Uhrzeigersinn oder andersherum? Davon hängt die der Wellenfunktion verliehene Phase ab. Die beiden Alternativen sind topologisch verschieden. Der Experimentator kann die im Uhrzeigersinn verlaufende Bahn nicht kontinuierlich in solche entgegen ▷

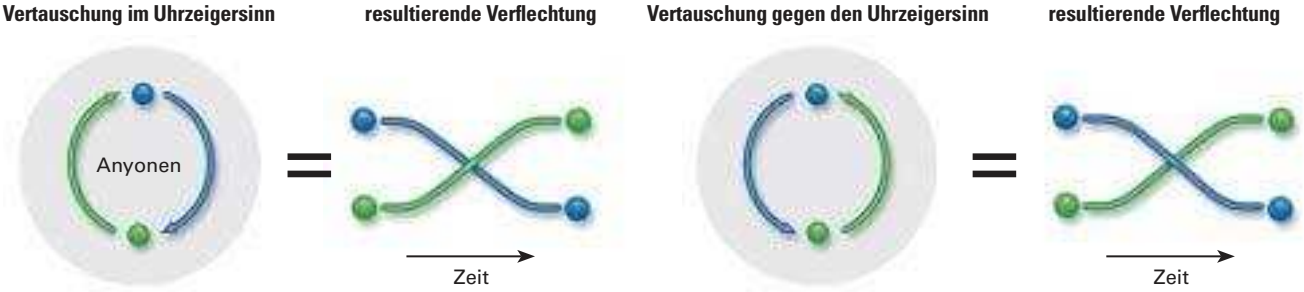
▷ dem Uhrzeigersinn überführen, ohne dass die Bahnen sich kreuzen und die Teilchen irgendwo kollidieren.

Für den Bau eines topologischen Quantencomputers muss noch eine wichtige Voraussetzung erfüllt werden: Die Anyonen müssen nichtkommutativ oder – nach dem norwegischen Mathematiker Niels Hendrik Abel, der im 19. Jahrhundert kommutative Gruppen untersuchte – »nichtabelsch« sein. Das bedeutet, die Reihenfolge, in der die Teilchen vertauscht werden, macht einen Unterschied. Angenommen, wir haben drei identische Anyonen in einer Reihe, in den Positionen A, B und C. Zuerst vertauschen wir die Anyonen an den Orten A und B, danach diejenigen, die jetzt die Orte B und C einnehmen. Wir erhalten die ursprüngliche Wellenfunktion, multipliziert mit einem Phasenfaktor.

Wie topologische Quantencomputer funktionieren

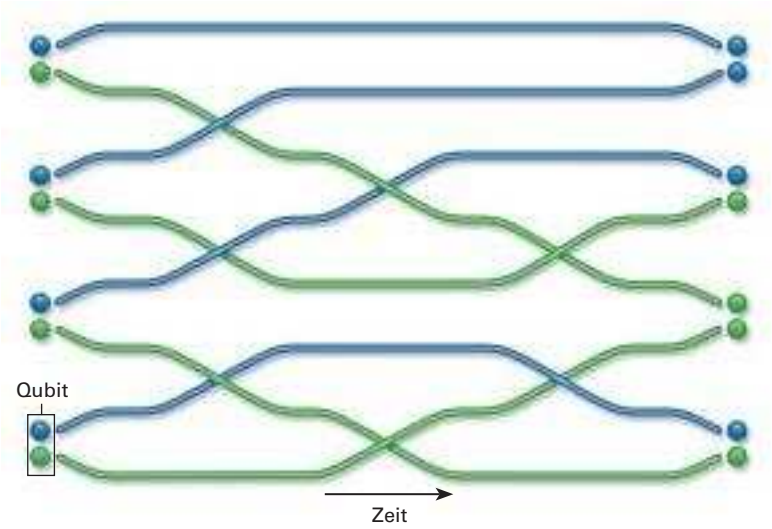
Zöpfe flechten

Um alle möglichen Zöpfe zu erzeugen, welche mehrere Anyonen mit ihren Weltlinien – den Bahnen in der Raumzeit – zu bilden vermögen, reichen schon Kombinationen von zwei einfachen Arten von Bewegungen in der Ebene aus: eine Vertauschung im Uhrzeigersinn und eine in umgekehrter Richtung. Es kommt beim Zöpfeflechten nur auf die Reihenfolge an.



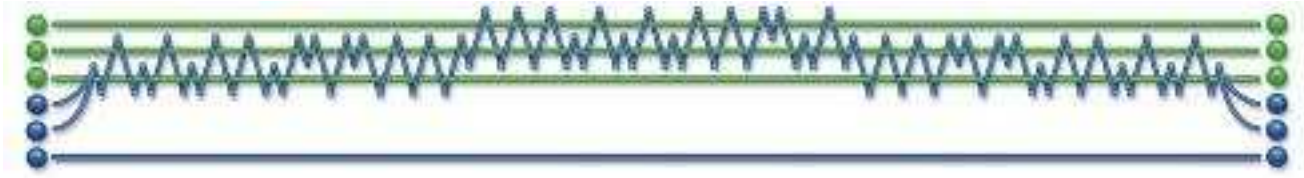
Berechnung

Zunächst werden Anyonen-Paare erzeugt und in einer Reihe angeordnet; sie repräsentieren die Qubits (Quanten-Bits) der Berechnung. Nun werden die Positionen benachbarter Anyonen in einer bestimmten Reihenfolge ausgetauscht. Diese Bewegungen entsprechen Operationen, die mit den Qubits ausgeführt werden. Schließlich werden Paare benachbarter Anyonen zusammengebracht und gemessen, um das Resultat der Berechnungen zu erhalten. Dieser Output hängt von der Topologie der speziellen Verflechtung ab, die durch die Vertauschungen erzeugt wurden. Kleine Störungen der Anyonen verändern diese Topologie nicht; dadurch wird die Berechnung unempfindlich für normale Fehlerquellen.



Konstruktion eines logischen Gatters

Durch diese komplizierte Verflechtung von sechs Anyonen entsteht ein spezielles logisches Gatter. Dieses so genannte kontrollierte NICHT-Gatter (englisch abgekürzt CNOT) hat zwei Qubits als Input und zwei Qubits als Output. Die Qubits werden durch Tripletts (grün und blau) von so genannten Fibonacci-Anyonen repräsentiert. Die spezielle Methode der Verflechtung – ein Triplett bleibt, wo es ist, und zwei Anyonen des anderen Tripletts wandern um die Anyonen des ersteren – vereinfacht die Konstruktion des Gatters. Diese Verflechtung erzeugt ein CNOT-Gatter, das bis auf 10^{-3} genau ist.



Was geschieht, wenn wir stattdessen zuerst die Anyonen bei B und C vertauschen, und erst dann die an den Orten A und B? Wenn dabei die Wellenfunktion mit demselben Faktor wie zuvor herauskommt, heißen die Anyonen abelsch. Wenn der Faktor hingegen von der Reihenfolge der Tauschvorgänge abhängt, handelt es sich um nichtabelsche Anyonen. Bei solchen Anyonen ist der Vertauschungsfaktor, mit dem die Wellenfunktion multipliziert wird, eine Zahlenmatrix, und das Ergebnis einer Multiplikation von zwei Matrizen hängt von der Reihenfolge ab, in der sie multipliziert werden.

Zöpfe und Gatter für störungsfreie Berechnungen

Goldmans Team suchte nach abelschen Anyonen, aber es gibt gute Gründe für die Annahme, dass bestimmte fraktionierte Quanten-Hall-Quasipartikel tatsächlich nichtabelsch sind. Um diese Frage zu klären, sind verschiedene Experimente vorgeschlagen worden – eines von Freedman zusammen mit Sankar Das Sarma von der Universität von Maryland in College Park und Chetan Nayak von Microsoft, mit wichtigen Verbesserungen von Ady Stern vom Weizmann-Institut in Israel und Bertrand Halperin von der Harvard-Universität. Ein anderer Vorschlag stammt von Kitaev und Parsa Bonderson vom California Institute of Technology sowie von Kirill Shtengel, der jetzt an der Universität von Kalifornien in Riverside tätig ist.

Wenn man über nichtabelsche Anyonen verfügt, lässt sich eine physikalische Darstellung der so genannten Zopfgruppe erzeugen. Diese mathematische Struktur beschreibt alle Möglichkeiten, eine gegebene Reihe von Fäden zu Zöpfen zu flechten. Jeder Zopf kann durch eine Reihe elementarer Operationen erzeugt werden, bei denen zwei benachbarte Fäden sich entweder im Uhrzeigersinn oder entgegen dem Uhrzeigersinn bewegen. Jede mögliche Abfolge von Anyonmanipulationen entspricht einem Zopf und umgekehrt. Außerdem entspricht jedem Zopf eine sehr komplizierte Matrix; sie entsteht durch die Kombination aller einzelnen Matrizen – jede für eine Anyonenvertauschung.

Nun können wir verstehen, wie die Zöpfe mit einer Berechnung im Quantencomputer zusammenhängen. Der Gesamtzustand eines herkömmlichen Computers ergibt sich aus der Gesamtheit seiner Bitzustände – aus der jeweiligen Folge von Nullen und Einsen in seinem Register. Ebenso wird ein Quantencomputer durch den kombinierten Zustand all seiner Qubits definiert. In einem topologischen Quantencomputer könnten diese Qubits durch Gruppen von Anyonen repräsentiert sein.

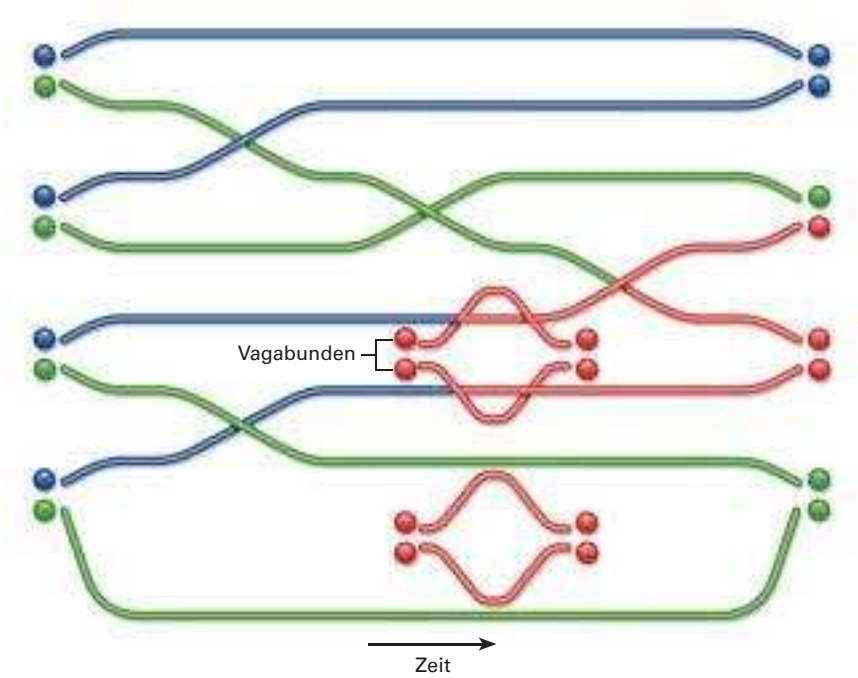
Den Übergang vom Anfangszustand sämtlicher Qubits zum Endzustand beschreibt ganz allgemein eine Matrix, mit der die gemeinsame Wellenfunktion aller Qubits zu multiplizieren ist. Bei einem topologischen Quantencomputer hängt diese Matrix mit dem speziellen Zopf zusammen, welcher der Abfolge von Anyonmanipulationen entspricht. Auf diese Weise ergeben die mit den Anyonen ausgeführten Operationen eine Quantenberechnung.

Eine wichtige Frage muss noch geklärt werden: Vermag unser topologischer Quantencomputer jede Berechnung auszuführen, die ein »gewöhnlicher«, das heißt nicht topologischer Quantencomputer bewältigt? Freedman bewies 2002 gemeinsam mit Michael Larsen von der Indiana-Universität und Zhenghan Wang, der jetzt für Microsoft arbeitet, dass ein topologischer Quantencomputer tatsächlich jede Berechnung eines anderen Quantencomputers simulieren kann, freilich mit einem Wermutstropfen – die Simulation funktioniert nur annähernd.

Immerhin gilt: Zu jeder gewünschten Genauigkeit – sagen wir eins zu zehntausend – lässt sich ein Zopf finden, der die geforderte Berechnung mit dieser Präzision simuliert. Je größer die gewünschte Genauigkeit, desto größer die Anzahl der Verdrehungen im Zopf. Zum Glück nimmt diese Zahl nur sehr langsam zu, und darum ist es nicht allzu schwierig, sehr hohe Genauigkeit zu erreichen. Der Beweis liefert allerdings kein Rezept, wie man den Zopf konstruiert, der zu einer Berechnung gehört. Das hängt von der speziellen Bauweise des topologischen Quantencomputers ▷

Vermeidung von Zufallsfehlern

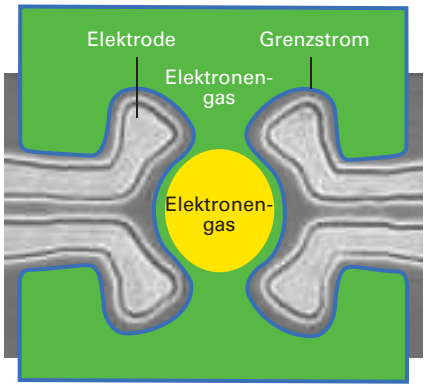
Bei topologischen Quantenberechnungen treten Fehler auf, wenn durch thermische Fluktuationen ein vagabundierendes Anyonen-Paar entsteht, das in den Zopf der Berechnung eingeflochten wird, bevor es sich selbst zerstört. Diese Vagabunden verderben dann die Berechnung (rote Linien). Die Wahrscheinlichkeit dieser Störung sinkt jedoch exponentiell mit der Entfernung, welche die Anyonen zurücklegen (vertikale Abstände im Raum-Zeit-Diagramm). Die Fehlerquote lässt sich auf ein Minimum senken, wenn man dafür sorgt, dass die an der Berechnung beteiligten Anyonen einander nicht allzu nahe kommen (unterstes Paar).



Schaltelemente für topologische Computer

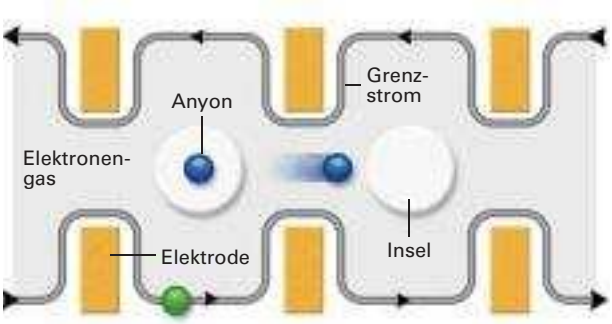
Anyonen-Detektor

Die kolorierte Mikrofotografie zeigt das Gerät, mit dem Vladimir J. Goldman und seine Mitarbeiter beobachteten, dass bestimmte Quasiteilchen – Erregungen im Quanten-Hall-Zustand – sich als Anyonen verhalten. Das Gerät wurde auf ein hundertstel Grad über dem absoluten Nullpunkt abgekühlt und einem starken Magnetfeld ausgesetzt. Um die vier Elektroden bildete sich ein zweidimensionales Elektronengas, wobei das gelb kolorierte Gebiet Anyonen enthielt und das grüne eine andere Art von Quasiteilchen.

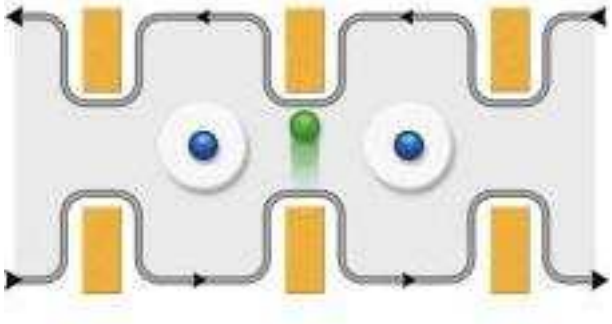


NICHT-Gatter

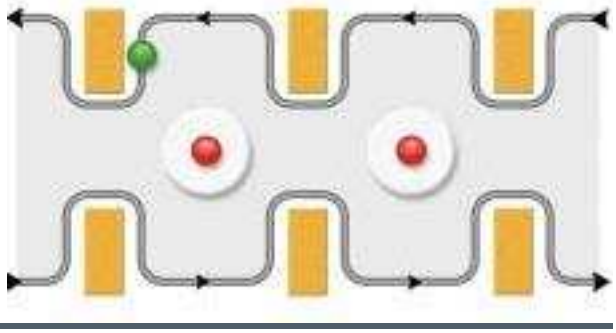
Das Konstruktionsschema eines anyonischen NICHT-Gatters beruht auf einem fraktionierten Quanten-Hall-Zustand mit Anyonen, die je ein Viertel der Elektronenladung tragen. Die Elektroden erzeugen zwei Inseln, auf denen Anyonen eingefangen werden können. Der Strom fließt längs der Grenze, kann aber unter geeigneten Bedingungen auch quer über die Engpässe tunneln.



1 Präparieren des Gatters: Zwei Anyonen (blau) werden auf die linke Insel gesetzt, dann wird ein Anyon durch Anlegen von Spannungen zur rechten Insel befördert. Dieses Anyonen-Paar repräsentiert das Qubit in seinem Anfangszustand. Er lässt sich durch Messen des Stroms bestimmen, der längs der benachbarten Grenze fließt.



2 Die NICHT-Operation: Um das Qubit entsprechend der logischen Verneinung in den entgegengesetzten Zustand umzuschalten, werden Spannungen angelegt, die ein Anyon aus der Grenze (grün) veranlassen, quer durch das Gerät zu tunneln.



3 Der Übergang dieses Anyons verändert die Phasenbeziehung des Anyonenpaars so, dass der Wert des Qubits in den entgegengesetzten Zustand übergeht (rot).

▷ ab, insbesondere davon, welche Art Anyonen man verwendet und wie sie elementare Qubits darstellen.

Das Problem, Zöpfe für bestimmte Berechnungen zu finden, untersuchte 2005 ein Team um Nicholas E. Bonesteel von der Staatsuniversität Florida. Das Team – teilweise an den Bell-Laboratorien der Firma Lucent Technologies tätig – konnte explizit zeigen, wie man aus sechs verflochtenen Anyonen ein so genanntes kontrolliertes NICHT-Gatter, englisch abgekürzt CNOT, konstruiert, dessen Genauigkeit mit zwei zu tausend einer Fehlerquote von nur 2 Promille entspricht (siehe Kasten S. 38).

Ein CNOT-Gatter hat zwei Eingänge: ein Kontrollbit und ein Zielbit. Wenn das Kontrollbit 1 ist, wandelt es das Zielbit von 0 in 1 um, oder umgekehrt. Andernfalls bleiben die Bits unverändert. Bei Verwendung von Qubits kann jede Berechnung mit einem Netz von CNOT-Gattern und einer zusätzlichen Operation erzeugt werden – der Multiplikation einzelner Qubits mit einer komplexen Phase. Dieses Resultat bestätigt wiederum, dass ein topologischer Quantencomputer jede Quantenberechnung auszuführen vermag.

Sind topologische Quantencomputer sogar noch leistungsfähiger als herkömmliche Quantencomputer? Ein von Freedman, Kitaev und Wang bewiesenes Theorem besagt, dass dies nicht der Fall ist. Wie sie zeigten, lassen sich die Operationen eines topologischen Quantencomputers beliebig genau auf einem herkömmlichen Quantencomputer simulieren. Das heißt, alles, was ein topologischer Quantencomputer vermag, kann auch ein herkömmlicher Quantencomputer. Dieses Ergebnis weist vielleicht auf ein allgemeines Theorem hin: Jedes hinreichend raffinierte Computersystem, das Quanteneffekte nutzt, hat exakt die gleichen Rechenfähigkeiten. Die entsprechende Aussage für herkömmliche Computer formulierten Alonzo Church und Alan Turing in den 1930er Jahren.

Ich habe zwei Prozesse noch gar nicht erwähnt, die für den praktischen Betrieb eines topologischen Quantencomputers wesentlich sind: die Initialisierung der Qubits vor Beginn der Berechnung und das Auslesen des Endresultats.

Bei der Initialisierung müssen Quasiteilchenpaare erzeugt werden, und das Problem ist herauszufinden, welche Art

von Quasiteilchen gebildet wurde. Im Prinzip führt man zu diesem Zweck Test-Anyonen um die erzeugten Paare herum und misst dann, wie sich die Testpartikel durch den Vorgang verändert haben. Die Veränderung des Test-Anyons gibt Auskunft über die Art der ursprünglichen Anyonenpaare. Ein verändertes Test-Anyon wird nicht mehr zusammen mit seinem Partner restlos vernichtet. Anyonenpaare, die nicht dem gewünschten Typ entsprechen, können dann entfernt werden.

Auch beim Auslesen gilt es, Anyonenzustände zu messen. Solange die Anyonen weit voneinander entfernt sind, lässt sich diese Messung nicht durchführen; sie müssen erst zu Paaren vereint werden. Grob gesagt prüft man, ob sich die Paare wie echte Teilchen und Antiteilchen völlig vernichten oder ob sie Ladungs- und Flussreste hinterlassen. Das ergibt, wie die ursprünglich exakten Teilchen-Antiteilchen-Zustände durch die Verflechtung verändert wurden.

Wie man Quantendaten eingibt und ausliest

Leider ist ein topologischer Quantencomputer gegen Fehler nicht völlig immun. Die größte Störquelle sind thermische Fluktuationen im Substratmaterial, die ein zusätzliches Anyonenpaar erzeugen können. Diese beiden Anyonen verflechten sich mit dem Zopf der Berechnung, und schließlich vernichtet sich das Paar wieder (siehe Kasten S. 39). Zum Glück wird dieser thermische Erzeugungsprozess durch die tiefe Betriebstemperatur des topologischen Quantencomputers unterdrückt. Außerdem sinkt die Wahrscheinlichkeit des gesamten Störvorgangs exponentiell mit der Weglänge der Eindringlinge. Darum kann man jede gewünschte Genauigkeit erzielen, indem man einen genügend großen Computer baut und die Anyonen bei der Verflechtung weit genug auseinander hält.

Vorläufig steckt das ganze Gebiet noch in den Kinderschuhen. Die Grundelemente, nichtabelsche Anyonen, wurden noch nicht experimentell nachgewiesen, und selbst die einfachsten logischen Gatter müssen erst gebaut werden. Das erwähnte Experiment von Freedman, Das Sarma und Nayak würde beide Ziele erreichen: Falls die beteiligten Anyonen sich wie erwartet als nichtabelsch erweisen, würde das Gerät die logische NICHT-Operation an dem Qubit-Zustand ausführen. Die drei Forscher schätzen die Fehlerrate bei diesem Prozess auf höchstens 10^{-30}. Der winzige Wert ergibt sich, weil die Fehlerwahrscheinlichkeit mit abnehmender Temperatur und zunehmendem Größenmaßstab exponentiell sinkt. Dieser exponentielle Faktor ist der wesentliche Beitrag der Topologie; bei herkömmlichen Quantencomputern gibt es nichts dergleichen.

Die Verheißung extrem niedriger Fehlerraten – um viele Größenordnungen kleiner als bei allen anderen Bauplänen für Quantencomputer – macht topologische Rechner so attraktiv. Außerdem ist die Herstellung fraktionierter Quanten-Hall-Geräte technisch ausgereift, denn dafür steht die Mikrochip-Industrie zur Verfügung. Das einzige Problem ist, dass die Apparate bei extrem niedrigen Temperaturen – bei einigen tausendstel Grad über dem absoluten Nullpunkt – arbeiten müssen, damit die Quasiteilchen stabil bleiben.

Falls nichtabelsche Anyonen tatsächlich existieren, könnten topologische Quantencomputer alle anderen Konkurrenten überflügeln und als Erste den Übergang von einzelnen Qubits und logischen Gattern zu vollwertigen Maschinen schaffen, die wirklich den Namen Computer verdienen. Berechnungen mit Quantenknoten und Zöpfen, vorerst noch eine exotische Alternative, könnten dann zum Standard für praktisch fehlerfreie Quantencomputer werden. ◁

Graham P. Collins ist Redakteur bei Scientific American und promovierter Physiker. Er dankt Michael H. Freedman, Direktor des Project Q bei der Firma Microsoft, für Hilfe bei der Vorbereitung dieses Artikels.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Anyon there? Von David Lindley in: Physical Review Focus, Bd. 16, Artikel 14, November 2005

Devices based on the fractional Quantum Hall Effect may fulfill the promise of quantum computing. Von Charles Day in: Physics Today, Bd. 58, S. 21, Oktober 2005

Topologically protected qubits from a possible Non-Abelian fractional Quantum Hall state. Von Sankar Das Sarma, Michael Freedman und Chetan Nayak in: Physical Review Letters, Bd. 94, S. 166802-1, April 2005

Weblinks zum Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

ANZEIGE

Neue Medikamente für Diabetiker

Zu den gefürchteten Auswirkungen der Zuckerkrankheit gehören schwere Durchblutungsstörungen. Doch besteht Grund zur Hoffnung: Zukünftig könnten Medikamente Diabetiker vor Erblindung, Nierenversagen und Amputationen bewahren.

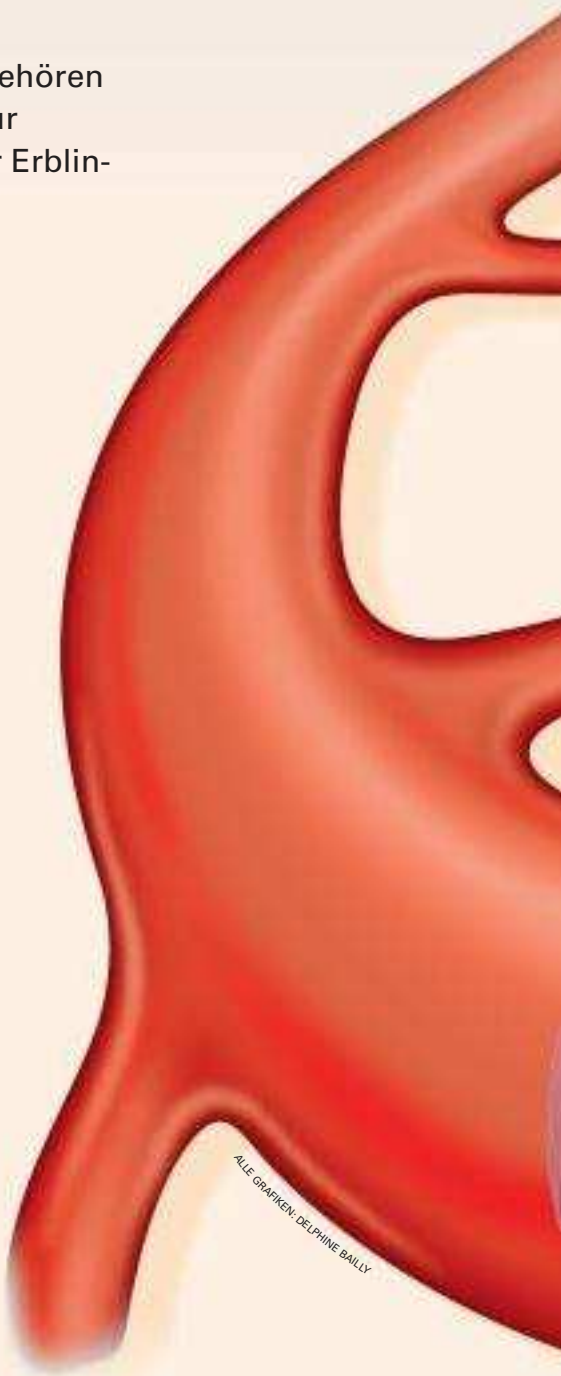
Von Bernard Lévy

Diabetikern wird stets eingeschärft, dass sie alles tun müssen, um ihren Blutzuckerspiegel im Normalbereich zu halten. Unweigerlich drohen sonst Gefäßveränderungen und Durchblutungsstörungen, die lebenswichtigen Organen schwer schaden. Gewöhnliche Alterungsprozesse der Adern treten bei diesen Patienten stark beschleunigt auf. Viele von ihnen erblinden, viele verlieren Gliedmaßen, oft versagen Nieren oder Herz. Die Forschung versteht inzwischen immer besser, warum überhöhte Blutzuckerwerte solche Wirkungen haben. Sie arbeitet an Medikamenten, die den fatalen Prozessen entgegenwirken.

Die Zahl der Menschen mit Diabetes mellitus wächst derzeit auf allen Erdteilen Besorgnis erregend. Das geht vor allem auf jene Diabetesform zurück, die durch unseren modernen Lebensstil begünstigt wird – auf den früher Altersdiabetes genannten Typ, der aber zunehmend auch junge Menschen, sogar schon Kinder, heimsucht. Schätzungsweise 195 Millionen Zuckerkranke dürfte es heute auf der Welt geben, sechsmal mehr als noch vor 15 Jahren. Die Internationale Diabetesföderation (IDF) rechnet mit etwa 330 Millionen im Jahr 2025. Experten sprechen inzwischen von einer Epidemie, die immer mehr Weltregionen erfasst. Längst weisen nicht mehr nur die Industrieländer in Europa und Nordamerika erschreckend hohe Zahlen Diabeteskranker auf. Denn auch in vielen Staaten Asiens, etwa in Indien, aber auch in Ostasien, steigt der Anteil Betroffener dramatisch. Längst hat die Diabeteswelle die Entwicklungsländer erfasst.

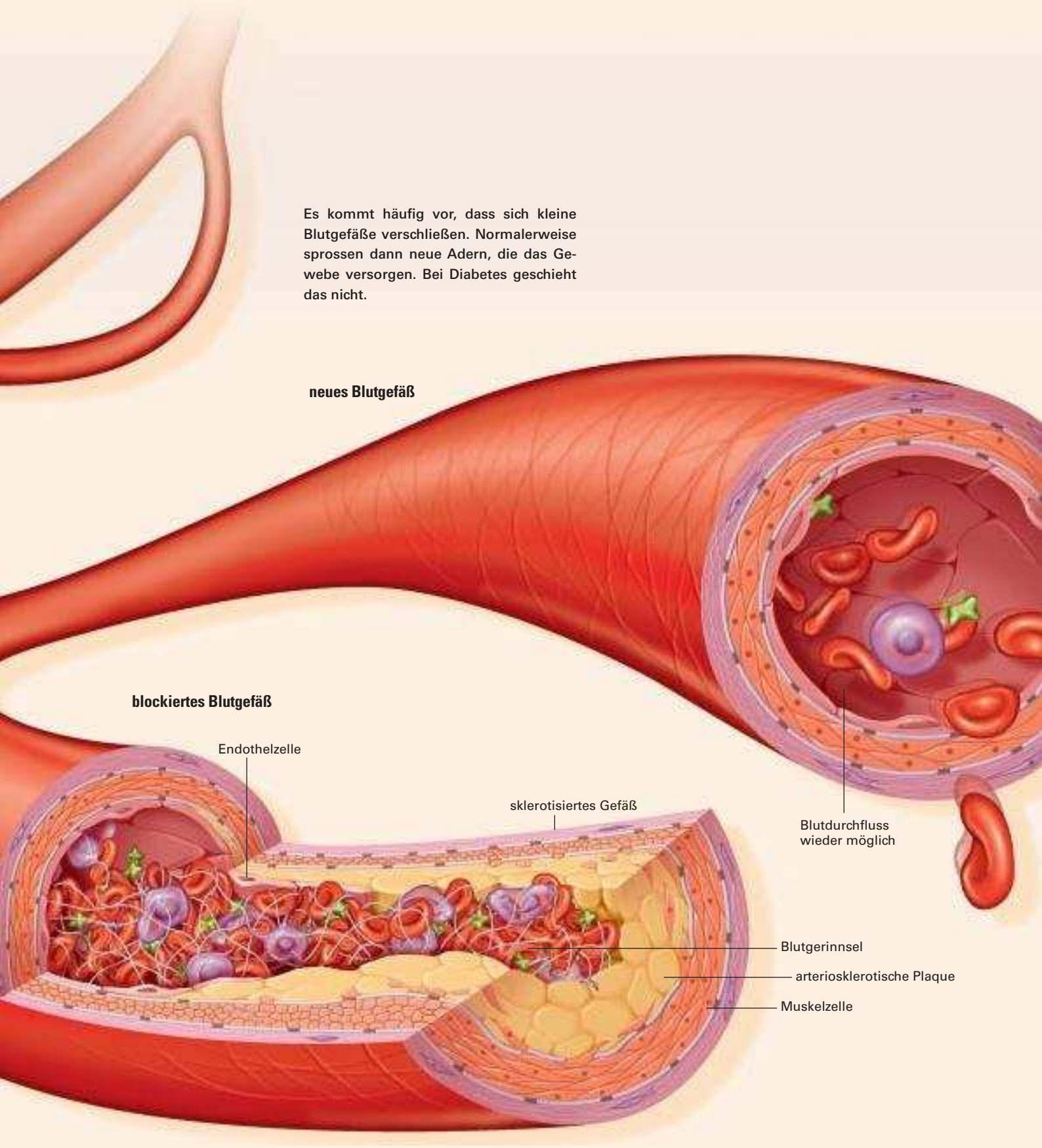
Deutschland zählt mit vier oder fünf Millionen Erkrankten – je nach Quelle – zu den europäischen Ländern mit der höchsten Diabeteshäufigkeit. Experten schätzen, dass die Dunkelziffer nochmals 1,5 Millionen ausmacht. Das würde bedeuten, dass hier zu Lande jeder Achte zuckerkrank ist. Weitere rund drei Millionen haben bereits einen gestörten Zuckerstoffwechsel, sind aber noch nicht krank. Der zunehmende Prozentsatz Zuckerkranker geht zum Teil zwar auch auf die Alterung der Bevölkerung zurück. Doch auch die Lebensgewohnheiten haben großen Einfluss, vor allem die zu energiereiche Ernährung und der Bewegungsmangel.

Als schwere Stoffwechselkrankheit, die den Zucker-, Protein- und Fettstoffwechsel beeinträchtigt, verursacht Diabetes mellitus in den meisten Industrieländern heute jeden vierten Todesfall – in der Regel bedingt durch Gefäßkomplikationen und infolgedessen Herzinfarkt, Herzschwäche oder Schlaganfall. In den westlichen Ländern ist der Diabetes zudem die häufigste Ursache für Erblin- ▷

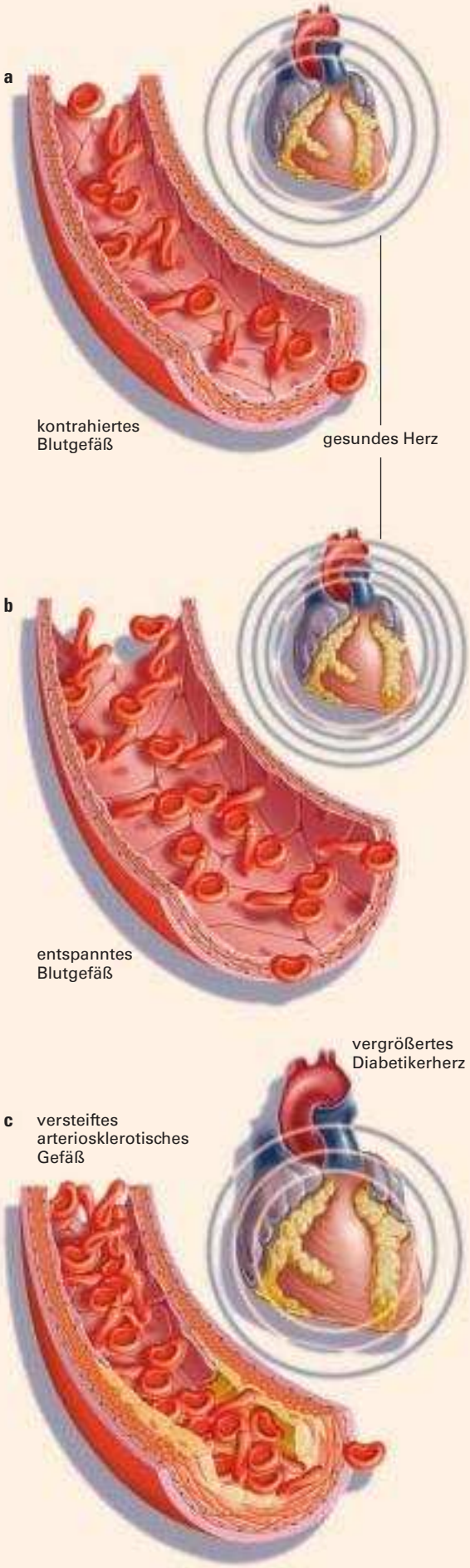


ALLE GRAFIKEN: DELPHINE BAILLY

Es kommt häufig vor, dass sich kleine Blutgefäße verschließen. Normalerweise sprossen dann neue Adern, die das Gewebe versorgen. Bei Diabetes geschieht das nicht.



Herzerweiterung



Gesunde Gefäße passen sich der Blutdurchflussmenge an, indem sie ihr Lumen verändern, das heißt sich bedarfsgerecht kontrahieren und erweitern. So muss das Herz nicht gegen einen unmäßigen Widerstand arbeiten. Der Blutdruck bleibt selbst bei hohem Sauerstoffbedarf der Gewebe etwa gleich (a und b).

Verlieren die Gefäßwände eines Zuckerkranken ihre Elastizität, weil sie verkalken und das Kollagen durch Zuckereinlagerung versteift, pumpt das Herz gegen einen beträchtlich erhöhten Widerstand an. Zum Ausgleich wird insbesondere die linke Hauptkammer größer (c).

▷ dungen, Amputationen und Nierenversagen.

Wieso aber nehmen die Blutgefäße bei einem erhöhten Blutzuckerspiegel Schaden? Warum versteifen ihre Wände, warum bilden sich arteriosklerotische Ablagerungen, warum treten Mangeldurchblutungen auf? Was ist überhaupt ein Diabetes und wie entsteht die Krankheit? Zunächst dazu einige medizinische Grundlagen:

Zucker ist für den Energiestoffwechsel des Körpers unentbehrlich. Hauptsächlich in Form von Traubenzucker – Glukose – nehmen die Zellen ihn aus dem Blut auf. Auch andere Zucker in der Nahrung sowie größere Kohlenhydrate wie Stärke erscheinen letztlich als Glukose im Blut. Sobald nach einer Mahlzeit der Blutzuckerspiegel ansteigt, registrieren das spezielle Zellen der Bauchspeicheldrüse (die B-Zellen, früher Beta-Zellen, in den Langerhans-Inseln). Sie geben daraufhin das Hormon Insulin ins Blut ab, und dieses Hormon veranlasst Leber-, Muskel- und Fettgewebezellen, Glukose aufzunehmen. Ob diese nun den Zucker sogleich verbrennen oder für später speichern – Insulin sorgt dafür, dass sich der Zuckergehalt im Blut schnell wieder normalisiert.

Gleiche Symptome bei beiden Diabetestypen

Bei einem Diabetes mellitus funktioniert dieser Vorgang nicht oder unzureichend. Der Zuckerstoffwechsel – Aufnahme, Verwertung und Speicherung von Glukose – ist grundlegend gestört. Anfänglich nach dem Essen, später ständig, bleibt der Blutzuckerspiegel höher als normal. Bei gesunden Menschen beträgt der Gehalt meist zwischen 80 und 100 Milligramm pro Deziliter Blut (0,8 bis 1 Gramm pro Liter). Bei Diabetikern kann er wesentlich höher sein, im Extrem sogar das Zwei- oder Dreifache betragen. Ab etwa 126 Milligramm pro Deziliter – gemessen im nüchternen Zustand – spricht man von einer Hyperglykämie (Überzuckerung) und einer Zuckerkrankheit. Bei etwa 180 Milligramm gelangt der Zucker auch in den Urin. Diabetes mellitus, ein schon im Altertum diagnostiziertes Leiden, bedeutet griechisch-lateinisch »süßer Durchfluss« (Zuckerharnruhr).

Bemerkbar machen kann sich die Erkrankung anfangs etwa durch Mattigkeit und Müdigkeit, Heißhungerattacken, vermehrten Harndrang und unstillbaren

IN KÜRZE

▶ Zu den **gefürchteten Spätfolgen** von Diabetes mellitus gehören Erblindung, Nierenversagen und abgestorbene Gliedmaßen sowie auch Herzversagen und Schlaganfall. Zurückzuführen sind sie auf Gefäßschäden, die auf Stoffwechselstörungen bei überhöhtem Blutzuckergehalt beruhen.

▶ Mehrere Phänomene – **versteifende Adern, arteriosklerotische Ablagerungen, mangelhafte Erneuerung von Blutgefäßen** – tragen zu den Spätfolgen bei. Im Grunde altern die Gefäße einfach viel zu schnell.

▶ Gegen einige Auswirkungen entwickeln Forscher bereits Medikamente. Solche **Wirkstoffe könnten helfen**, die Adern elastisch und »jung« zu erhalten.

starken Durst. Trotz gleicher Symptome kann sie zwei ganz verschiedene Ursachen haben. Entsprechend unterscheiden Mediziner zwei Diabetestypen. Den Typ 1 bezeichnen sie traditionell als juvenilen oder insulinpflichtigen Diabetes, den Typ 2 als Altersdiabetes oder nichtinsulinpflichtigen Diabetes, auch wenn die Namen die Situation nicht immer völlig treffen. Sie geben aber Auskunft über den unterschiedlichen Hintergrund der Krankheit.

Diabetiker vom Typ 1 bilden kein oder fast kein Insulin mehr, weil die betreffenden Zellen der Bauchspeicheldrüse zerstört sind. Es handelt sich um eine Autoimmunkrankheit: Das eigene Immunsystem greift diese Zellen an. Der Diabetes Typ 1 tritt oft schon in jungen Jahren, mitunter bereits im Kindesalter, in Erscheinung. Diese Menschen müssen fortan regelmäßig Insulin spritzen. Nicht einmal jeder zehnte Diabetiker gehört in diese Gruppe. Auch ist ihr Anteil in der Bevölkerung weit gehend stabil, ganz im Gegensatz zum Typ 2.

Bei dieser zweiten Gruppe, rund 90 Prozent der heutigen Diabetiker, bildet die Bauchspeicheldrüse noch Insulin – zumindest noch über einige Jahre. Aber die Körperzellen reagieren auf das Hormon zu schwach. Mediziner sprechen von Insulinresistenz. Der Blutzuckerspiegel ist darum trotz Insulin zu hoch, obwohl der Organismus zunächst oft besonders viel davon bereitstellt im Versuch, den Wert zurückzuregeln. Allerdings erschöpfen sich die Hormonzellen der Bauchspeicheldrüse vielfach mit der Zeit. Dann benötigen auch diese Patienten Insulininjektionen.

Der Typ-2-Diabetes scheint beim größeren Teil der Betroffenen mit Übergewicht zusammenzuhängen. Etwa 80 Prozent dieser Diabetiker sind zu dick. Bei Fettleibigkeit tritt die Krankheit oft schon um das 40. Lebensjahr herum auf. Neuerdings gibt es erschreckende Meldungen über zunehmenden Alterszucker bei übergewichtigen Kindern und Jugendlichen. Das steigende Durchschnittsgewicht der Menschen in vielen Ländern könnte nach Ansicht mancher Experten erklären, wieso die Zahl Zuckerkranker so drastisch wächst.

Warum aber prädestiniert Dicksein für Diabetes? Warum sprechen die Körperzellen bei Übergewicht schlechter auf Insulin an, selbst wenn das Hormon in normalen oder sogar erhöhten Mengen gebildet wird? Es sieht so aus, als würden viele Zellen ihre Energie nun vornehmlich von den im Fettgewebe gespeicherten Fettsäuren beziehen, welche ja reichlich zur Verfügung stehen. Besonders die Muskulatur mit ihrem hohen Energiebedarf bedient sich dort. Überschüssigen Zucker nehmen die Zellen nun erst gar nicht auf. Er reichert sich dann im Blut an.

Wie eine Insulinresistenz entsteht, ist auf molekularer Ebene noch nicht völlig geklärt. Es gibt allerdings Hinweise, dass das Fettgewebe übergewichtiger Diabetiker Zytokine (lokale Wirkstoffe) bildet und dass diese Moleküle die Substanz Adiponectin hemmen. Adiponectin aber macht Zellen für Insulin empfindlich.

Gleich welcher Diabetestyp – die hohe Glukosekonzentration im Blut hat für die Adern auf Dauer verheerende Folgen. Dabei kommen mehrere Phänomene zusammen. Durch Verfestigung der Kollagenfasern verlieren die Arterienwände ihre Elastizität, ihre Geschmeidigkeit. ▷

Ein neues Blutgefäß entsteht

Der Anreiz für Gefäßneubildung ist Sauerstoffmangel im betreffenden Gewebe, etwa wegen Gefäßverstopfung (a). Zellen der inneren Aderwand erzeugen Wachstumsfaktoren sowie Enzyme – Metalloproteasen –, mit denen sie die Wand des Gefäßes lokal auflösen (b).

Bald sprosst an der Stelle ein neues Äderchen (c), dem Metalloproteasen ebenfalls den Weg frei machen. Bei Diabetikern sind die Strukturen durch Verzuckerung der Moleküle zu fest geworden. Die Enzyme können sie nicht lockern. Das Gewebe geht an Sauerstoffmangel zu Grunde.

▷ Die innere Auskleidung der Adern, das Endothel, stellt die Produktion von Substanzen ein, die normalerweise Verengung und Erweiterung des Gefäßlumens steuern. Zugleich vermehren sich in der Gefäßwand die glatten Muskelzellen übermäßig. Auch lagern sich im Lumen der Adern Plaques aus Cholesterin und anderen Lipiden ab. Solche arteriosklerotischen Verengungen bedeuten ein Risiko für Gefäßverschlüsse. Des Weiteren verdichtet sich die extrazelluläre Matrix, die Substanz zwischen den Zellen der Gefäßwände: Hier lagert sich Kalzium ein, was zur Versteifung der Gefäßwände beiträgt.

Gestörter Cholesterinhaushalt

Zusätzlich weisen gerade Diabetiker, besonders bei schlecht eingestelltem Blutzuckerspiegel, oft eine erhöhte Konzentration von einigen Blutfetten auf – von Lipoproteinen geringer Dichte (LDL), »ungutem« Cholesterin. »Gutes« Cholesterin – Lipoproteine hoher Dichte (HDL) – ist bei ihnen oft in zu geringer Menge vorhanden. Das ist ungünstig, denn HDL transportiert Cholesterin in die Leber, wo es abgebaut wird. Bei zu niedrigem HDL-Spiegel entstehen an den Gefäßwänden vermehrt arteriosklerotische Plaques.

Zwar ist es an sich normal, dass sich im Alter in den Adern Ablagerungen bilden und dass die Gefäßwände allmählich steifer werden. Aber bei Diabetikern altern die Adern deutlich schneller. Deswegen zeigen sich Durchblutungsstörungen schon in viel früheren Jahren, und die Schäden sind massiver und allgemeiner. Zum Beispiel haben gesunde Frauen vor den Wechseljahren selten solche Erscheinungen, während Diabetikerinnen manchmal schon früh heftige Gefäßprobleme dieser Art bekommen.

Auch Kalziumeinlagerungen in Arterien sind bei Diabetikern häufiger als normal. Verkalkungen können sich bei Zuckerkrankheit sowohl in den arteriosklerotischen Plaques innen an den Gefäßwänden finden als auch in der mittleren Schicht der Gefäßwand, wo Muskelzellen und Kollagenfasern liegen. Fatalerweise entwickeln sich beim Diabetiker arteriosklerotische Defekte nicht nur in den großen zentralen Arterien, sondern auch an der Körperperipherie, so besonders in den Beinen, und selbst in feinen Adern.

Vor einigen Jahren wiesen die Arbeitsgruppen von Alain Rivard an der Medizinischen Fakultät der Tufts-Universität in Boston (Massachusetts) und Jeffrey Isner an der Duke-Universität in Durham (North Carolina) in Studien an diabetischen Mäusen einen verheerenden Sachverhalt in diesem Zusammenhang nach: Ein Wachstumsfaktor (der *vascular endothelial growth factor*, VEGF) ist in der minderdurchbluteten Muskulatur zu wenig vorhanden. Das aber hat zur Folge, dass die schadhaften, zu wenig durchlässigen und irgendwann blockierten feinen Adern nicht wie bei gesunden Menschen durch neue ersetzt werden.

Bei ausgeprägten Gefäßschäden dieser Art erhält das von den Adern versorgte Gewebe nicht genug, schlimmstenfalls gar keinen Sauerstoff. (Mediziner sprechen bei mangelnder Durchblutung eines Organs oder Körperteils wegen Gefäßverengungen oder -blockade von einer Ischämie.) Zunächst treten eher geringfügige Symptome auf: zum Beispiel kalte Füße und Wundheilungsstörungen, auch Schwierigkeiten, längere Strecken schmerzfrei zu gehen. Später aber können kleine Wunden zu chronischen Geschwüren werden. Bildet sich gar eine diabetische Gangrän, ein Gewebszerfall (Brand) mit schwerer Infektion, ist wegen der Sepsisgefahr eine Amputation des abgestorbenen, nekrotischen Glieds häufig unumgänglich. Von den in Deutschland jährlich zirka 44 000 Amputationen an den unteren Extremitäten betreffen rund 30 000 – etwa 70 Prozent – Diabetiker.

Die Augenschäden haben andere Ursachen. In der Netzhaut besteht bei Diabetes, anders als in den peripheren Gefäßen, nicht ein Mangel, sondern ein Übermaß an Wachstumsfaktoren für neue Äderchen. Oftmals sprießen sie vor allem in einem Bereich rund um die Zone schärfsten Sehens (um eine zentrale minderdurchblutete Region). Blutungen, Netzhautablösungen und Flüssigkeitsansammlungen unter der Netzhaut gefährden dann das Augenlicht. Jährlich erblinden in Deutschland etwa 2000 Diabetiker. Aber auch ohne solche Netz-

Versteifte Arterienwände

Kollagenfasern verleihen der Aderwand die nötige Elastizität, um sich zu kontrahieren und zu entspannen (a und b). Bei Verzuckerung – Glykierung – vernetzen sich die Fasern miteinander über Zuckerbrücken und werden unbeweglich (c).

hautkomplikationen kann das Sehvermögen beim Diabetiker leiden, denn Zuckerablagerungen können die Augenlinse trüben. Dieses wichtige Phänomen, bei dem sich Zuckermoleküle an Linsenproteine anheften – Fachleute bezeichnen es als Glykierung (»Verzuckerung«) –, werde ich weiter unten noch eingehender darstellen.

Insulin als fataler Wachstumsfaktor

Defekte an Blutgefäßen nennen Mediziner Angiopathien – entsprechend heißen Veränderungen an großen Arterien oder Venen Makroangiopathien und solche an feinen Adern, insbesondere an Kapillaren, Mikroangiopathien. Die diabetische Mikroangiopathie geht immer mit einer Verdickung der Basalmembran der Blutkapillaren, also der feinsten Gefäße, und der Ablagerung von glykierten (zuckerversetzten) Proteinen außen am Gefäß einher. Denn, so paradox es klingt: Nicht wenige Diabetiker haben wegen ihrer Insulinresistenz einen unphysiologisch hohen Insulinspiegel, teils krankheitsbedingt, teils wegen der notwendigen Medikation. Das Hormon aber wirkt auf verschiedene Zelltypen auch als Wachstumsfaktor, der die Wirkung anderer vorhandener Wachstumsfaktoren verstärkt. Das kann eine Verhärtung von Arterien und Venen fördern, und es scheint sich auch ungünstig auf die glatte Muskulatur der Aderwände auszuwirken, was wiederum die Arteriosklerose vorantreibt.

Dass außer den Augen auch die Nieren bei Diabetes stark durch eine Mikroangiopathie gefährdet sind, dürfte damit zusammenhängen, dass sie ebenfalls besonders dichte Kapillarnetze aufweisen. Die normalerweise stark durchbluteten Filterkörper sklerotisieren dann und bringen die erforderliche Leistung nicht mehr. Viele Patienten sind deshalb nach einigen Jahren auf die Dialyse angewiesen. Umgekehrt sind ein Fünftel der Dialysepatienten zuckerkrank.

Eine gestörte Mikrozirkulation ist auch ein wesentlicher Grund für die gravierenden neuronalen Empfindungsstörungen bis hin zum nicht bemerkten Herzinfarkt, die bei Diabetes in späteren Stadien typisch sind. Es kommt häufig vor, dass periphere Nerven nicht mehr gut funktionieren, sodass der Patient Wunden und selbst starke Verletzungen an den Beinen und Füßen oft nicht spürt und sie nicht rechtzeitig versorgen lässt.

Fatal sind aber auch die diabetischen Makroangiopathien, die typischen Schäden der großen Gefäße, die Arteriosklerose wie auch Versteifung der Aderwände umfassen. Das ist ein Grund, warum Diabetiker so häufig Herzinfarkte und Schlaganfälle erleiden.

Wenn der Arzt einen Diabetes diagnostiziert, weiß er meist nicht, seit wann die Krankheit bereits besteht, das heißt wie lange der Patient hohem Blutzucker ausgesetzt war. In aller Regel sind Folgeschäden am Gefäßsystem umso schlimmer, je länger der Zustand währte. Und je früher die Therapie einsetzt, desto besser gelingt es, die Funktion der Blutgefäße zu erhalten. Angesichts der vermutlich hohen Zahl unerkannt Zuckerkranker ist dies eine Herausforderung nicht nur für die Ärzte.

Rückgängig machen kann man bereits eingetretene Schäden und Störungen bislang leider nicht – obwohl die Forschung intensiv daran arbeitet. Aber zumindest lässt sich eine weitere Verschlechterung verzögern, wenn der Zuckerspiegel gut eingestellt wird. Das heißt auch, dass dann die Lebenserwartung des Patienten steigt. Man sollte jedoch nicht außer Acht lassen, dass für Herz und Blutgefäße auch Übergewicht, Bluthochdruck und das Rauchen hohe gesundheitliche Risikofaktoren darstellen, die behandelt und behoben werden sollten.

Nun möchte ich genauer darauf eingehen, wieso die Wände der Adern bei anhaltend hohem Blutzuckerspiegel mit der Zeit ihre Geschmeidigkeit verlieren und damit ihre Fähigkeit, sich je nach Sauerstoffbedarf der versorgten Organe und Gewebe zu erweitern oder zu verengen. Was da geschieht, hat offensichtlich mehrere Fassetten. Wie Forschungen zum Beispiel zeigten, produziert die Innenwand der Adern (das Endothel) weniger gefäßerweiternde Substanzen, nämlich Stickstoffmonoxid und Prostacyclin. Prostacyclin ist überdies ein wichtiger Faktor, der die Zusammenlagerung von Blutplättchen zu Gerinnseln hemmt.

Der Mangel dieser erweiternden Faktoren spielt gleichermaßen bei der Entstehung von pathologischen Veränderungen sowohl der großen Arterien wie der feinen Blutgefäße eine zentrale Rolle. Weil die Aderwände bei höherem Sauerstoffbedarf nicht weiter werden – sich der Flusswiderstand nicht erniedrigt –, muss das Herz nun gegen einen hö- ▷

WICHTIGE ONLINE-ADRESSEN

» **Dipl.-Ing. Runald Meyer VDI**
Entwicklung, Konstruktion, Technische Berechnung Strömungsmechanik
www.etastern.de

» **DOK – Düsseldorfer Optik-Kontor**
Kontaktlinsen online bestellen
www.dok.de

» **Kernmechanik – Optimiertes Modell: Kernspin + Dipolmomente**
www.kernmechanik.de

» **Quantenphysik 17.-19.11.06**
Seminar für physikalisch und philosphisch Interessierte, geistige Anregung und körperliche Erholung in schönem Ambiente
www.fem-institut.de

» **Zahn-Implantate preiswert**
Sparen Sie bis zu € 2000 für ein Titanimplantat plus Zirkonoxid-Krone
www.dentaprime.info

Hier können Sie den Leserinnen und Lesern von Spektrum der Wissenschaft Ihre WWW-Adresse mitteilen. Für € 83,00 pro Monat (zzgl. MwSt.) erhalten Sie einen maximal fünfzeiligen Eintrag, der zusätzlich auf der Internetseite von Spektrum der Wissenschaft erscheint. Mehr Informationen dazu von

GWP media-marketing
Mareike Grigo
Telefon 0211 61 88-579
E-Mail: m.grigo@vhb.de

▷ heren Widerstand arbeiten. Viele Diabetiker leiden daher an einer krankhaften Herzvergrößerung (siehe Bild S. 44).

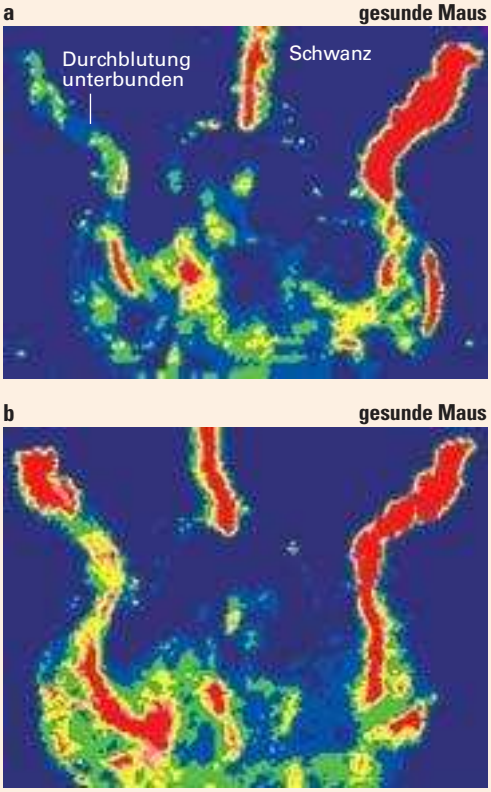
Schuld an dem Manko an entspannenden Faktoren sind für Zellen giftige Sauerstoffradikale in der Gefäßauskleidung, das heißt oxidativer Stress. Der Grund dafür ist ein gestörtes Gleichgewicht zwischen den freien Radikalen und ihren Gegenspielern, das bei einer zu hohen Zuckerkonzentration inner- und außerhalb der Zellen aufkommt. Freie Radikale werden nicht rasch genug abgefangen: Sie greifen große Moleküle an, etwa Lipoproteine und auch Nukleinsäuren der Erbsubstanz DNA.

Ein anderes intensiv erforschtes Phänomen, welches die Gefäßschäden maßgeblich erzeugt, ist die schon erwähnte »Verzuckerung« von Molekülen. Die Forscher sagen dazu Glykosilierung (Glykosylierung) oder kurz Glykierung. Vereinfacht gesagt gehen Zuckermoleküle in verschiedensten Geweben hochstabile Verbindungen mit Proteinen, Lipiden und Nukleinsäuren ein. Dies geschieht durch mehrere chemische Schritte. Am Ende sind die Moleküle mit dem Zucker durch feste Brücken verknüpft, die sich von allein praktisch nicht wieder lösen. Wissenschaftler sprechen von Endprodukten der Glykierung (englisch abgekürzt »Ages«).

Solche hochstabilen Glykierungs-Endprodukte entstehen, wie viele Sekundäreffekte bei Diabetes, in fast allen Geweben auch bei der normalen Alterung. Doch wieder einmal beschleunigen hohe Zuckerkonzentrationen, in dem Fall besonders auffällig in den Gefäßwänden, den Prozess erheblich.

Keine neue Durchblutung

Wird bei Mäusen die Blutversorgung eines Beins unterbunden, erholen sich gesunde Tiere (linke Bilder) besser als diabetische (rechte Bilder). Bei Ersteren regeneriert die Blutversorgung. Gezeigt ist der Zustand direkt nach dem Eingriff (a und c) und nach vier Wochen (b und d). Rot bis gelb bedeutet gute Durchblutung, grün bis blau schlechte.



Diabetischer Bluthochdruck

Auch mit dem roten Blutfarbstoff Hämoglobin bilden sich Vorstufen von Glykierungs-Endprodukten – die wohl nicht sonderlich schaden. In der medizinischen Diagnose misst man deren Menge, um festzustellen, wie hoch die Blutzuckerwerte angereichert über die letzten Wochen waren. So kann der Arzt kontrollieren, wie gut die Blutzucker- und Insulineinstellung ist. Wegen der kurzen Lebensdauer der roten Blutkörperchen reicht diese Messung bis zu höchstens drei Monate zurück.

Weiches Gewebe, das die Endprodukte in größeren Mengen enthält, hat typischerweise eine gelblich braune Verfärbung. Charakteristisch ist außerdem seine verminderte Elastizität, denn die Brücken zwischen den Proteinen, insbesondere zwischen Kollagenfasern, machen die Strukturen starr. Besonders gut untersucht ist das für die extrazelluläre Matrix der Arterienwände – die kollagenhaltige Substanz, in welche die Zellen eingebettet sind.

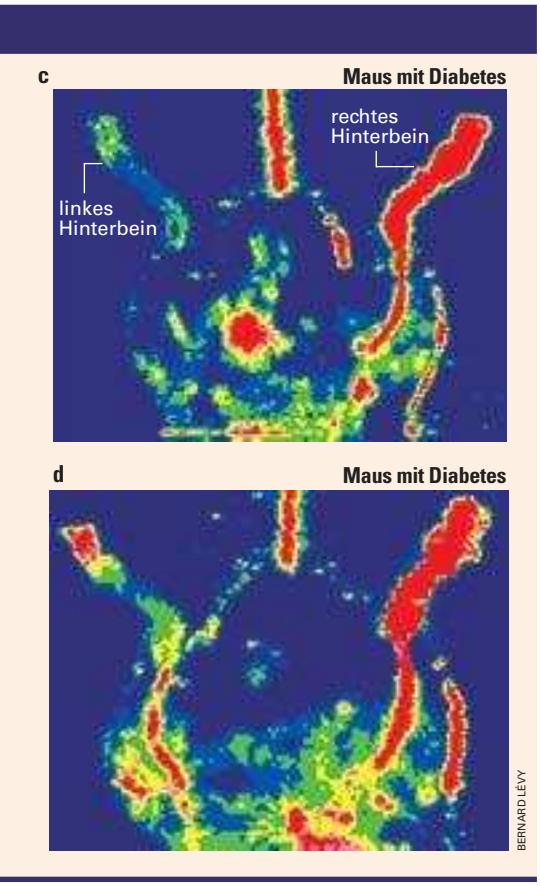
Auch diese Matrix wird mit zunehmender Glykierung immer steifer. Die Kollagenfasern können schließlich untereinander über Brücken so fest verkettet sein, dass sie praktisch nicht mehr aneinander vorbeizugleiten vermögen. Solche Arterien können sich nicht mehr erweitern, wenn mehr Blut hindurchgepumpt werden muss – einer der Gründe für den diabetischen Bluthochdruck.

Nun ließen sich die störenden Glykierungs-Endprodukte mit bestimmten Wirkstoffen im Prinzip wieder chemisch knacken. Vielleicht könnte man mit Medikamenten sogar verhindern, dass sich die fatalen Molekülbrücken überhaupt ausbilden. An beiden Aspekten arbeiten Forschergruppen bereits intensiv.

Am besten wäre natürlich, wenn die risikobehafteten Gebilde erst gar nicht entstünden. In Tierversuchen unterbindet der Stoff Aminoguanidin spezifisch eine Verzuckerung der betreffenden Moleküle. In Gegenwart dieser Substanz treten keine weiteren Glykierungs-Endprodukte auf, weil der Wirkstoff Vorstufen abfängt. Die Kollagenfasern in den Aderwänden werden darum nicht über Bindungsbrücken zusammengekettet – trotz eines bleibend hohen Blutzuckerspiegels. Andere physiologische Folgeerscheinungen eines bei den Tieren induzierten Diabetes verhindert das Aminoguanidin nicht.

Dass die Arterien diabetischer Versuchstiere ungewöhnlich steif sind, hatten wir schon 1993 nachgewiesen. Es wundert nicht, dass deswegen im arteriellen System der Gefäßwiderstand steigt und daraufhin die Herzbelastung zunimmt. Genauso wenig überrascht, dass sich die linke Herzkammer unnatürlich vergrößert – bei Nagern schon nach einigen Wochen – und Herz-Kreislauf-Komplikationen drohen. Erhalten diabetische Tiere allerdings Aminoguanidin, bleiben der Gefäßwiderstand in der Aorta normal und das Herz klein.

Leider schädigt der Wirkstoff die Leber. Menschen mit Diabetes mellitus kann man ihn deswegen nicht zur Vorbeugung von Arterienversteifung, Bluthochdruck und Herzerweiterung geben.



Doch die Mediziner kennen bereits besser verträgliche Substanzen, die zumindest nachträglich die Verknüpfungen in den fatalen Glykierungs-Endprodukten wieder aufbrechen (und deswegen englisch *age-breaker* heißen). Als wir diabetischen Ratten einen solchen Age-Breaker über längere Zeit verabreichten, waren ihre Arterien schon nach drei Wochen wieder normal geschmeidig. Denselben Wirkstoff erprobte das Team des Alternsforschers Peter Vaitkevicius, jetzt an der Universität von Michigan in Ann Arbor, an gesunden, aber betagten Rhesusaffen. Im Verlauf von sechs Wochen hatte sich bei ihnen die altersbedingt steifer gewordene Aorta zumindest in dieser Hinsicht wieder »verjüngt«. Ja sogar das Herz arbeitete wieder besser: Offenbar war die Herzwand wieder elastischer geworden. Wie Ultraschallaufnahmen zeigten, hatte sich die Füllungskapazität der linken Hauptkammer, die zwischen den Kontraktionen beim Altersherz – und bei fortgeschrittenem Diabetes – weniger Blut aufnimmt, normalisiert. Die Pumpleistung der Affenherzen hatte sich verbessert: Das Medikament scheint auch in der Herzwand unerwünscht zusammengekettete Kollagenfasern getrennt zu haben.

Es gibt bereits Studien mit Age-Breakern an menschlichen Testpersonen. So erhielten 62 Bluthochdruckpatienten, die alle älter als fünfzig Jahre waren, zwei Monate lang einen solchen Wirkstoff. Tatsächlich stieg die Elastizität der Aorta merklich, und beim Schlag des Herzens war der Blutdruck nicht so hoch wie vorher. Dieser Ansatz verspricht neue Therapieformen bei alters- wie diabetesbedingten Herz- und Kreislaufproblemen.

Mangel an neuen Adern

Zum Schluss möchte ich nochmals auf die schwer wiegenden Durchblutungsanomalien des Herzmuskels, der Nieren, der Netzhaut und der unteren Extremitäten zurückkommen, unter denen viele Diabetiker leiden. Wie weiter vorn erwähnt, entstehen sie teilweise deswegen, weil sich defekte Gefäße nicht regenerieren, das heißt sich in unterversorgten Geweben keine neuen Adern bilden.

Wenn bei einem gesunden Menschen in einem Bereich eines Gewebes nicht genügend Sauerstoff ankommt, dauert es gewöhnlich nur ein paar Tage, bis wieder eine bessere Versorgung hergestellt ist. Der Mangelzustand löst an der betroffenen Stelle eine Kette von Reaktionen aus, als deren Folge neue Blutgefäße aussprossen. Hieran beteiligen sich Zellen aus der Innenwand von in dem Gebiet vorhandenen Äderchen. Sie verlassen die Kapillare und bahnen sich einen Weg in das umgebende, darbende Gewebe, wobei sie sich vermehren und schließlich ein neues, funktionsfähiges Gefäß ausbilden.

Zu Beginn dieses gesamten Vorgangs müssen die ersten Zellen die kollagenreiche Basalmembran ihrer Umgebung an einer Stelle auflösen. Sie produzieren zu dem Zweck spezielle Enzyme – Metalloproteasen (siehe Bild S. 45). Mit solchen Enzymen lockern sie auch die extrazelluläre Matrix des unterversorgten Gewebes, in das sie eindringen.

Bei Zuckerkrankheit widersteht die extrazelluläre Matrix offenbar weit gehend dem Angriff der Metalloproteasen. Das konnten wir vor Kurzem an Mäusen nachweisen. Wir klemmten gesunden und diabetischen Tieren eine Beinarterie ab, um die Blutversorgung eines Fußes zu unterbinden. Bei den gesunden Nagern sprossen daraufhin schnell neue Gefäße, die bald wieder eine ausreichende Durchblutung der Pfote gewährleisteten. Die Gefäßversorgung hatte sich nach drei Wochen fast wieder normalisiert. Auch die diabetischen Mäuse bildeten zwar einige neue Adern, doch diese blieben offenbar funktionell minderwertig (siehe Bilder links). So waren vor allem Kontraktion und Erweiterung der neuen Versorgungsleitungen unzulänglich.

Nachweislich war an der gestörten Gefäßerneuerung nicht ein Mangel an Metalloproteasen schuld, auch nicht eine zu schwache Aktivität der Enzyme. Vielleicht wurden sie aber mit den dort im Gewebe vorhandenen Mengen an verzuckerten, also praktisch fest miteinander verklebten Kollegenfasern nicht fertig. Anscheinend können die Enzyme neuen Blutgefäßen nur durch eine geschmeidige Umgebung einen Weg bahnen.

Die schwersten akuten Komplikationen eines Diabetes mellitus, wie vor allem das diabetische Koma, lassen sich heute medizinisch recht gut abfangen. Dagegen sind die Möglichkeiten der Prävention und Therapie von Gefäßschäden, die insbesondere bei schlecht eingestellten und älteren Zuckerkranken auftreten, bisher weniger befriedigend. Zwar wecken erste Ergebnisse der Molekularmedizin Hoffnung, dass zumindest einige Folgen der Stoffwechselentgleisung zukünftig verhindert oder abgemildert werden können. Trotzdem besteht hier noch ein hoher Forschungsbedarf – umso mehr, als die Zahl Zuckerkranker dramatisch zunimmt. ◁

Bernard Lévy ist Professor für Physiologie an der Universität von Paris 7 und leitet das Zentrum für Herz-Kreislauf-Forschung des Pariser Hôpital Lariboisière (INSERM U689).

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Diabetes mellitus. Gesundheitsberichterstattung des Bundes, Heft 24. Robert-Koch-Institut, Berlin (Hg.)

Diabetes mellitus. Ratgeber für ein besseres Verständnis. GEK Gmünder Ersatzkasse (Hg.), Schwäbisch Gmünd

Blockade of advanced glycation end product formation restores ischemia-induced angiogenesis in diabetic mice. Von R. Tamarat et al. in: Proceedings of the National Academy of Sciences USA, Bd. 100, Heft 14, 2003, S. 8555

A cross-link breaker has sustained effects on arterial and ventricular properties in older rhesus monkeys. Von Peter V. Vaitkevicius et al. in: Proceedings of the National Academy of Sciences USA, Bd. 100, Heft 3, 2001, S. 1171

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

DÜSENTRIEBWERK

Aktion gleich Reaktion

Einsteigen, anschnallen und ab in den Urlaub – dank Isaac Newtons drittem Gesetz.

Von Bernhard Gerl

Langsam rollt der Urlaubsflieger in Startposition, dann heulen die Düsen auf und ab geht es. Und mancher, der da nun von der Beschleunigung in seinen Sitz gepresst wird, mag sich fragen, welche Kraft ihn eigentlich nach Mallorca oder in die Südsee bringt? Es würde ihn wohl überraschen zu erfahren, dass es dasselbe Phänomen ist, das auch ein Boot abtreiben lässt, wenn sein Insasse ans Ufer springt: der Rückstoß.

»Aktion gleich Reaktion« lautet das dritte Gesetz Isaac Newtons (1643 – 1727). Auch beim Propellerflugzeug wird Luft nach hinten beschleunigt, um voranzukommen. Am 27. August 1939 nutzte das erste Flugzeug mit Strahltriebwerk diesen Effekt, die deutsche Heinkel He 178. In den letzten Kriegsmonaten 1944 sorgte der »Düsenjäger« Messerschmitt Me 262 für Aufsehen, da er wesentlich schneller als alle Propellerflugzeuge flog. Bald nach Kriegsende, am 27. Juli 1949, absolvierte dann das erste Linien-Passagierflugzeug mit Turbinentriebwerk seinen Jungfernflug, die britische De Havilland Comet I. Inzwischen hat sich diese Technik im Luftverkehr weit gehend durchgesetzt, da sie einen besseren Wirkungsgrad und höhere Geschwindigkeiten ermöglicht.

Ein Luftstrahltriebwerk saugt Luft an, die verdichtet, dabei erhitzt und dann in einer Brennkammer mit dem Kraftstoff vermischt wird. Nach der Zündung expandiert das Gas und tritt mit hohem Druck aus der Schubdüse aus – der Rückstoß entsteht. Außerdem treibt die Explosion des Gemischs eine Turbine an, die wiederum die Energie für den Verdichter liefert.

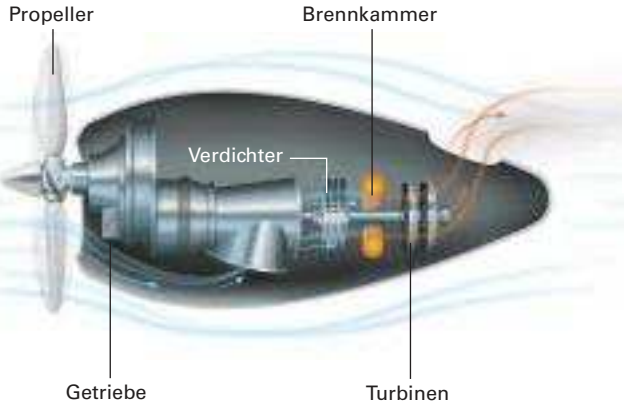
Solche »Einstromtriebwerke« kommen heute noch bei Kampfjets zum Einsatz, da sie sehr schnell beschleunigen. Dafür werden hohe Lärmbelastung und großer Kraftstoffverbrauch in Kauf genommen. In der zivilen Luftfahrt und für militärische Transportflugzeuge hat sich das Zweistromstrahltriebwerk, auch Turbofan genannt, durchgesetzt. Ein Gebläse, englisch *fan*, saugt Außenluft ein, ein Teil davon wird dem meist mehrstufigen Kompressor zugeführt. Ein Neben- beziehungsweise Mantelstrom hingegen fließt um den Verbrennungsantrieb herum direkt zur Düse. Dem Abgas beigemischt, senkt er dessen Temperatur und reduziert so den Lärm, den die Expansion des heißen Gases beim Austritt aus der Düse verursacht. Außerdem sinkt die mittlere Geschwindigkeit des expandierten Gases, was den Wirkungsgrad, also die Kraftstoffausnutzung, verbessert. Moderne Turbofans erreichen ein Nebenstromverhältnis von 8 : 1.

Etwa sechzig Prozent der freigesetzten Energie treiben über Schaufelräder Turbinen an; die wiederum halten Fan, Verdichter sowie Generator und Hydraulikpumpen in Gang. Treiben die Turbinen einen Propeller an, spricht man von Turbopropmaschinen. Diese Flugzeuge erreichen Geschwindigkeiten bis zu 700 Kilometer pro Stunde. Ihr Vorteil: Weil sie im Vergleich zum Strahltriebwerk die Luftmengen nicht so stark beschleunigen, verbrauchen sie weniger Kraftstoff. Turbofans ermöglichen bis zu 850 Kilometer pro Stunde und das Fliegen in höheren, dünneren Luftschichten.

Fantriebwerke für Kampfjets arbeiten mit einem Nebenstromverhältnis von nur 0,4 : 1, der Großteil der angesaugten Luft fließt also direkt in die Brennkammer. Da der Sauerstoff dort nicht vollständig verbrennt, kann ein Nachbrenner zusätzliche Beschleunigung liefern. Der Eurofighter erreicht so doppelte Schallgeschwindigkeit – bei hohem Treibstoffverbrauch.

Sicherheit und Wirtschaftlichkeit gehören zu den Hauptkriterien bei der Entwicklung neuer Triebwerke, geringe Schadstoffemissionen und Lärmreduktion sind mittlerweile ebenso wichtig. Seit Mitte der 1960er Jahre wurde der Kerosinverbrauch und mit ihm der Kohlendioxidausstoß um etwa vierzig Prozent gesenkt. Allerdings kompensiert das Wachstum des Luftverkehrs diese Entwicklung weit gehend: In Europa verzeichneten die Flugsicherungseinrichtungen 2005 ein Plus von 4,5 Prozent. Außerdem haben sich im Gegenzug zur Verbrauchsreduktion die Stickoxidemissionen erhöht. Innerhalb der nächsten zehn bis fünfzehn Jahre soll der Kerosinverbrauch deshalb um weitere zwanzig, der Stickoxidausstoß um achtzig Prozent sinken. Neue Konzepte setzen auf Regelungselektronik und den vermehrten Einsatz von Kunststoffen und anderen leichten Materialien sowie auf Wärmetauscher, die aus dem Abgasstrom Energie zurückgewinnen. Außerdem soll ein Getriebe zwischen der schnell laufenden Turbine und dem Verdichter dafür sorgen, dass beide Komponenten in ihrem jeweils optimalen Drehzahlbereich laufen können. Das verbessert den Wirkungsgrad und verringert den Triebwerkslärm. ◁

Bernhard Gerl ist Technik- und Wissenschaftsjournalist in Mainz.



Turbopropmaschinen erzeugen den Rückstoß mit einem Propeller. Der fungiert auch als Luft ansaugendes Gebläse und wird von den Turbinen angetrieben.

WUSSTEN SIE SCHON?

▶ **Auch Raketen arbeiten mit dem Rückstoßprinzip.** Der Treibstoff wird aber nicht mit Umgebungsluft, sondern mit einem mitgeführten Oxidationsmittel, zum Beispiel flüssigem Sauerstoff, verbrannt. In China sind Raketen seit dem 13. Jahrhundert dokumentiert. Sie wurden bei Feuerwerken, vermutlich aber auch als Waffe und zur Nachrichtenübermittlung eingesetzt.

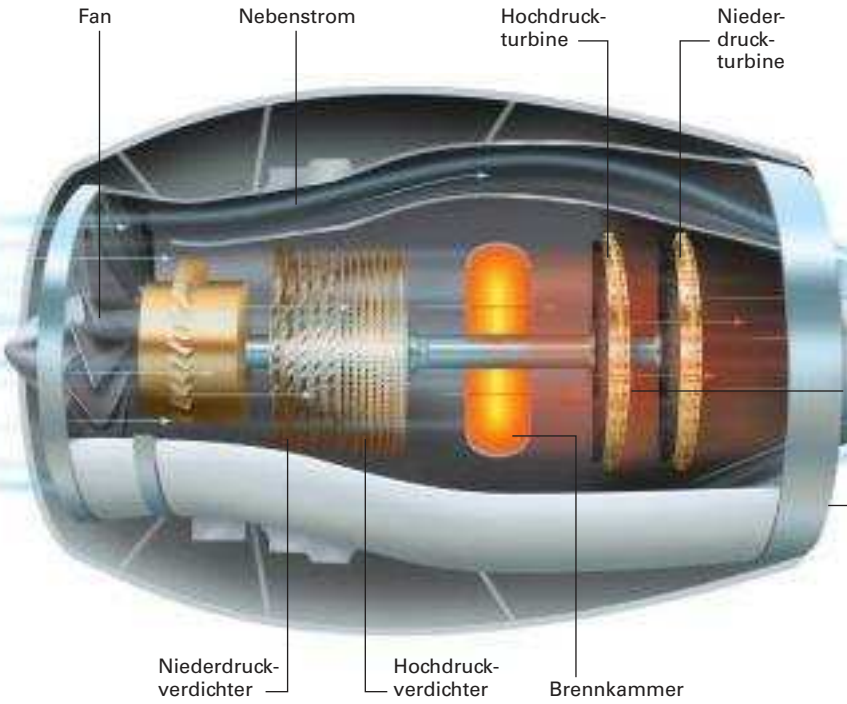
▶ **Heron von Alexandria soll bereits 120 v. Chr.** gezeigt haben, dass man das Rückstoßprinzip zum Antrieb verwenden kann. Seinen Schriften nach erhitzte er Wasser in einer eisernen Kugel, bis der ausströmende Dampf sie in Rotation versetzte.

▶ **Ein Staustrahltriebwerk** (englisch *Ramjet*) beschleunigt Kampfjets und Lenkwaffen auf doppelte bis vierfache Schallgeschwindigkeit. Da Verdichter hier nicht mehr funktionieren, nutzt man die Kompression durch den Überschallflug selbst. Dazu bringt ein Düsen- oder Raketentriebwerk den Flugkörper auf die nötige Geschwindigkeit. Ein konisch geformter Einlass bremst die einströmende Luft, sodass sie mit Unterschallgeschwindigkeit die Brennkammer erreicht (siehe Bild unten). Beim Scramjet *(Supersonic Combustion Ramjet)* erfolgt auch die Verbrennung mit Mach > 1. Zwar haben Luft und Treibstoff kaum Zeit, sich zu vermischen, dennoch gelangen im Jahr 2004 unbemannte Testflüge der Nasa mit dem X-43A, der zwanzig Sekunden lang Mach 9,8 erreichte, beziehungsweise 11 000 Kilometer pro Stunde.

▶ **Auch Tiere nutzen das Rückstoßprinzip**. So bewegt sich der Kampferkäfer mit Hilfe körpereigener Gase über die Wasseroberfläche, der Oktopus beschleunigt, indem er im Gefahrenfall oder bei der Jagd Wasser aus einer Röhre hinter den Kiemen presst.

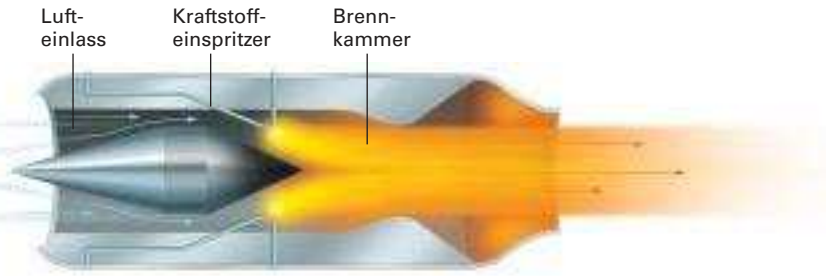
▶ **Nähert sich ein Flugzeug der Schallgeschwindigkeit** (Mach = 1), bilden sich Stoßwellen, die den Luftwiderstand erheblich ansteigen lassen. Er sinkt erst wieder, wenn diese Schallmauer durchbrochen ist. Bei noch höherer Geschwindigkeit (Mach > 1) schleppt das Flugzeug jeweils an Bug und Heck eine kegelförmige Stoßwelle hoher Energie mit, wobei dieser »Machsche Kegel« umso spitzer wird, je schneller sich die Maschine bewegt. Ein Beobachter hört, wenn ihn die Kegel passieren, einen Doppelknall im Abstand von Zehntelsekunden. Erst danach nimmt er die Motorengeräusche wahr.

ALLE ILLUSTRATIONEN: KENT SNODGRASS, PRECISION GRAPHICS

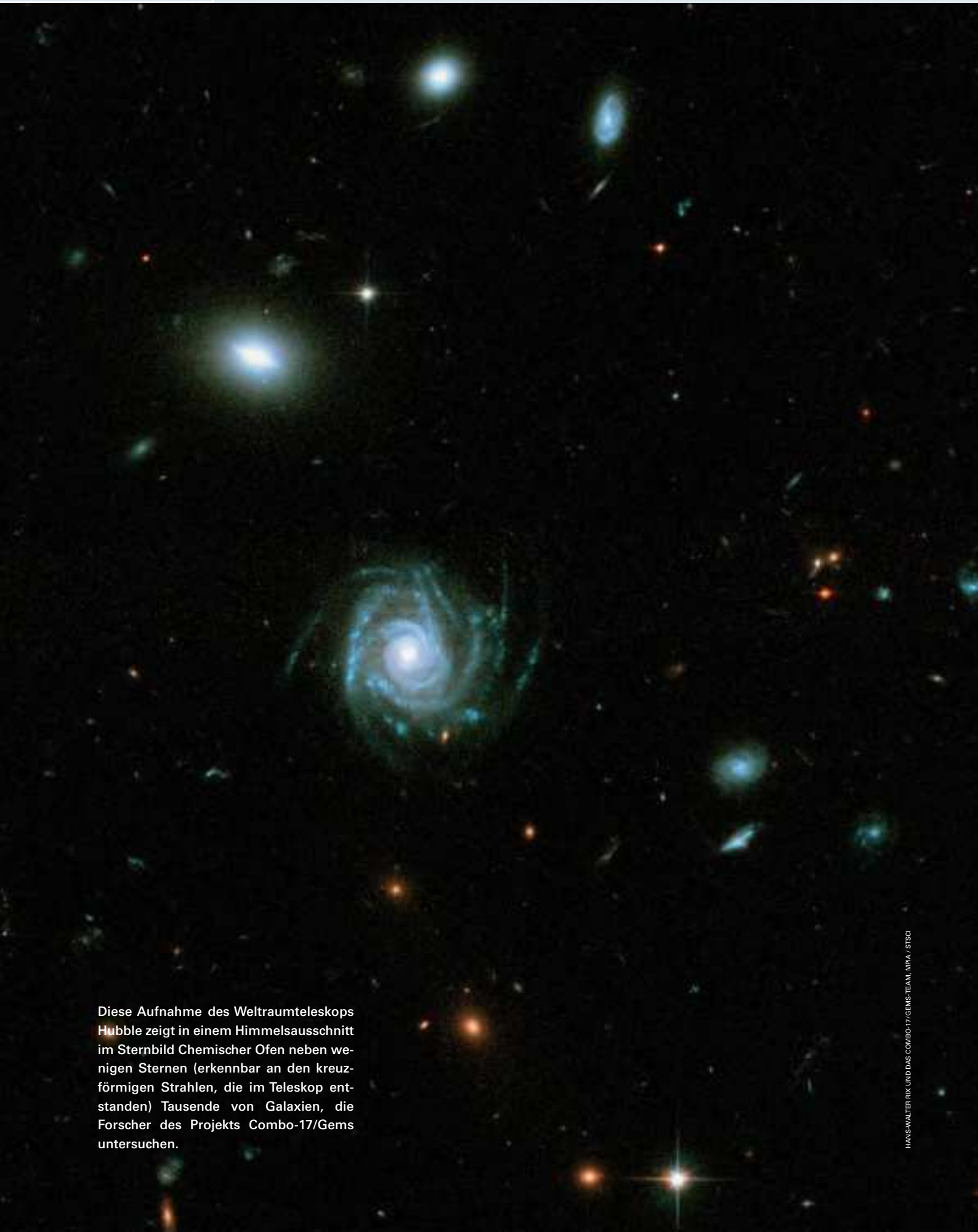


Ein Turbofan saugt Luft ein und führt sie in zwei Strömen weiter. Dabei wird sie im Nebenstrom etwa auf den doppelten Umgebungsdruck verdichtet und dann durch die Verengung der Düse beschleunigt. Die Luft im Primärstrom wird um den Faktor dreißig bis vierzig komprimiert, dabei erhitzt und sodann in der Brennkammer mit Treibstoff vermischt und gezündet.

Das explodierende Gasgemisch entweicht durch die Düse. Es versetzt außerdem Turbinen in Rotation, die wiederum über eine gemeinsame Welle den Fan und die Verdichter antreiben.



Staustrahltriebwerke nutzen zur Kompression den Überschallflug selbst.



Diese Aufnahme des Weltraumteleskops Hubble zeigt in einem Himmelsausschnitt im Sternbild Chemischer Ofen neben wenigen Sternen (erkennbar an den kreuzförmigen Strahlen, die im Teleskop entstanden) Tausende von Galaxien, die Forscher des Projekts Combo-17/Gems untersuchen.

HANS-WALTER RIX UND DAS COMBO-17/GEMS-TEAM, MPIA / STSCI

Entdeckungen in den tiefen Feldern

Mit lang belichteten Himmelsaufnahmen unternehmen Astronomen eine Volkszählung der Galaxien und erforschen die Biografien dieser Welteninseln. Auf einer Tagung in Venedig zogen sie eine Zwischenbilanz.

Von Götz Hoeppe

Eine seltsame Mode ist über die Astronomen gekommen: Sie nehmen die Finsternis zwischen den Sternen ins Visier. Mit den größten Teleskopen und den empfindlichsten Detektoren beobachten sie am Himmel kleine Stellen, an denen bislang niemand etwas gesehen hat. Dutzende von Stunden belichten sie ihre Aufnahmen, als ob es im Nichts doch noch etwas zu entdecken gäbe. Und tatsächlich finden sie nach genauer Auswertung der Bilder eine Fülle lichtschwacher Pünktchen.

Manche der Punkte erweisen sich als Licht, das 12,7 Milliarden Jahre zu uns unterwegs war. Das Universum ist mit 13,7 Milliarden Jahren nur wenig älter, und so sind es vermutlich Protogalaxien, die den Vorläufern heutiger Welteninseln entsprechen. Dieser spektakuläre Nachweis gelang japanischen Astronomen unter der Leitung von Yoshiaki Taniguchi von der Universität Kioto. Um diese Objekte nachzuweisen, mussten die Forscher ihre Aufnahmen mit einer elektronischen Kamera am Acht-Meter-Teleskop Subaru auf dem Mauna Kea auf Hawaii insgesamt 72 Stunden lang belichten.

Auch Rychard Bouwens von der Universität von Kalifornien in Santa Cruz hat sich auf die Untersuchung »tiefer Felder« (Deep Fields) spezialisiert. So nennen Astronomen diese mit langen Belichtungen untersuchten Himmelsausschnitte. In Aufnahmen des Weltraumteleskops Hubble meint Bouwens, Hinweise auf noch weiter entfernte Objekte zu erkennen. Doch sind diese Kandidaten hart an der Nachweisgrenze und deshalb umstritten.

Licht vom Rand der Welt

Ende März sind Taniguchi und Bouwens nach Venedig gereist, um mit ihren Kollegen über die neuesten Beobachtungen zur Evolution von Galaxien und kosmischen Strukturen zu diskutieren. Entfernungsrekorde sind für Astronomen immer interessant, doch viele der Forscher betrachten sich eher als Historiker, welche die Lebenswege typischer Welteninseln enträtseln wollen. Sie haben gelernt, die tiefen Felder als Archiv der kosmischen Geschichte zu nutzen.

Zum dritten Mal nach 2001 und 2003 haben sich die Galaxienforscher in der Lagunenstadt versammelt. Zweihundert Wissenschaftler aus Europa, Nordamerika, Israel, Japan und China sind der Einladung von Alvio Renzini gefolgt, der nach mehr als zwanzig Jahren an der Europäischen Südsternwarte in Garching nach Padua zurückgekehrt ist und dort als Professor für theoretische Astrophysik lehrt. Pausenlos ist er in Bewegung, begrüßt Freunde, leitet Diskussionen oder gibt Hinweise für die Teilnehmer. Dass die Vorträge in einem prächtigen Renaissancegebäude am Canal Grande gehalten werden, dem Palazzo Cavalli Franchetti, trägt zur guten Stimmung bei: »Hätte die Tagung im Betonklotz der Europäischen Südsternwarte stattgefunden, dann wäre ich nicht gekommen«, sagt ein Teilnehmer und lacht.

Beim letzten Treffen in Venedig ging es noch darum, wie man die Kräfte der Beobachter bündeln und die Datenausbeute gerecht verteilen könne. Inzwischen sind viele dieser Kampagnen ge- ▷

▷ lungen und die Forscher stehen staunend vor einem Berg neuer Erkenntnisse. Erstmals ist es möglich, den Lebensweg der Welteninseln im Verlauf der kosmischen Geschichte zu dokumentieren, und zwar nicht nur für einzelne helle Objekte, sondern für einen vermeintlich repräsentativen Querschnitt.

Folgenden Befunden scheint eine Schlüsselrolle zuzukommen:

▶ Manche Galaxien waren bereits eine Milliarde Jahre nach dem Urknall erstaunlich massereich. Besonders spektakulär ist ein Objekt, das Bahram Mobasher vom Space Telescope Science Institute in Baltimore und seine Kollegen mit dem Weltraumteleskop Hubble fanden und JD-2 getauft haben. Falls Mobasher Recht hat, ist es mit 500 Milliarden Sonnenmassen fünfmal so massereich wie unsere Milchstraße und von uns fast so weit entfernt wie die von Taniguchi und seinen Kollegen entdeckten Rekordhalter.

▶ Vor 7 bis 9 Milliarden Jahren gab es eine Phase besonders heftiger Sternentstehung, an deren Ende die massereichen Galaxien der »Roten Reihe« ausgebildet waren. Diese befinden sich meist in dicht bevölkerten Regionen des Kosmos, etwa den Zentren von Galaxienhaufen. Im Astronomenjargon ist eine Galaxie »rot und tot«, wenn in ihr keine Sterne mehr geboren werden. Das gilt vor allem für die so genannten elliptischen Galaxien. Die rote Farbe beruht auf dem Licht ihrer vorwiegend alten Sternpopulation.

▶ Neue Sterne entstehen seitdem in kleineren, blauen Galaxien, die zur »Blauen Wolke« gezählt werden. Meist sind sie spiralförmig oder unregelmäßig. Ihre Farbe weist darauf hin, dass sie junge, heiße Sterne enthalten. Astronomen finden diese »lebendigen« Galaxien eher in weniger bevölkerten Bereichen des Kosmos. Unsere Milchstraße gilt als Grenzfall: Sie ist eine massereiche Spiralgalaxie am Rand eines Galaxienhaufens, in der pro Jahr ein Stern mit der Masse unserer Sonne geboren wird.

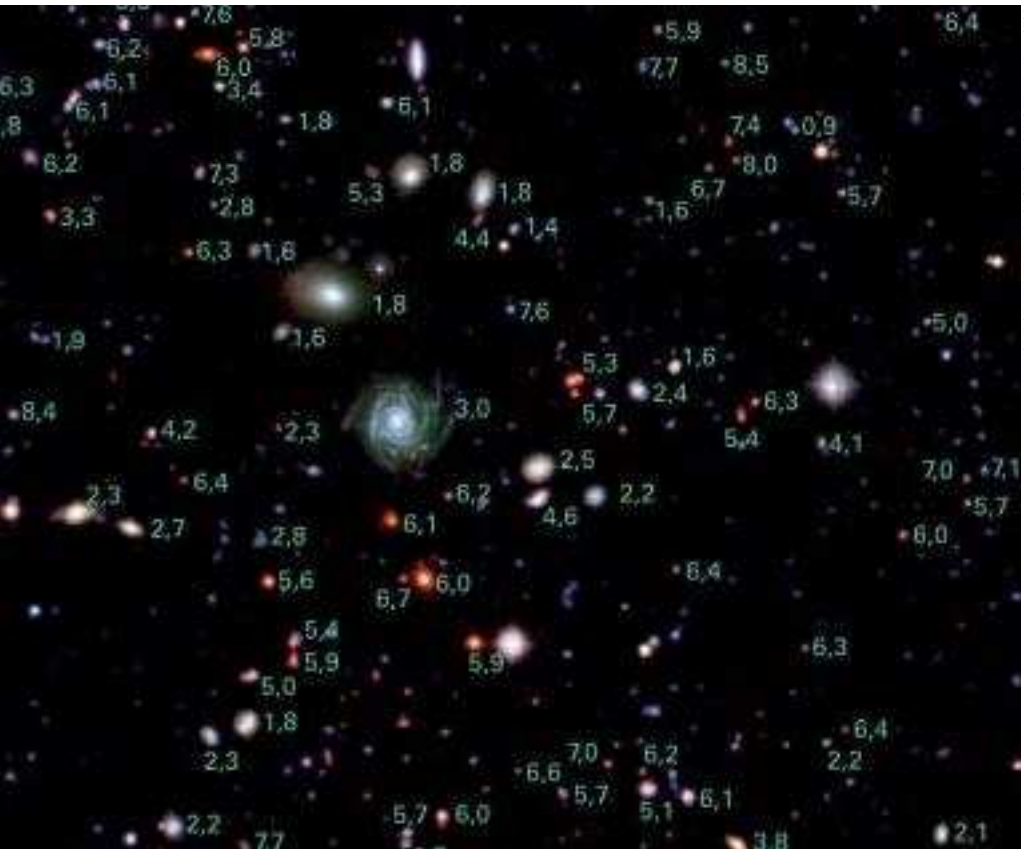
Historiker der Welteninseln

Die Erkundung der tiefen Felder begann im Sommer 1995. Damals beschloss Robert Williams, die gesamte für ihn als Direktor des Space Telescope Science Institute reservierte Beobachtungszeit mit dem Weltraumteleskop Hubble zu nutzen, um eine kleine Himmelsregion in der Nähe der Deichsel des Großen Wagens zu beobachten: das Hubble Deep Field. Drei Jahre später wurde mit Hubble ein zweites Feld im Sternbild Tukan untersucht, das für Sternwarten der Südhalbkugel erreichbar ist. Mitte der 1990er Jahre gingen mehrere irdische Großteleskope in Betrieb und binnen kurzer Zeit sprossen weitere tiefe Felder aus dem Himmelshintergrund. Während Forscher der Universität Hawaii das ursprüngliche Hubble Deep Field erweiterten, indem sie auch die Nachbarregion einbezogen, beobachteten Taniguchi und seine Kollegen ein neues Feld im nördlichen Sternbild Haar der Berenike. Astronomen der Universitäten Göttingen, Heidelberg und München konzentrierten sich hingegen auf eine neue Region im südlichen Sternbild Bildhauer.

Alle dieser Felder wurden ausgewählt, um mit so genannten Rückschaustudien das Licht als Zeitmaschine nutzen. Galaxien entwickeln sich zu langsam, als dass man direkt sehen könnte, wie sich einzelne Exemplare verändern. So sind die Forscher gezwungen, aus Beobachtungen von Objekten in unterschiedlichen Lebensabschnitten auf typische Biografien zu schließen. Dass das Universum expandiert und das von entfernten Objekten stammende Licht dehnt, hilft ihnen beim Aufstellen der Chronologie. Je weiter ein Objekt entfernt ist, desto größer ist seine Rotverschiebung und dementsprechend älter ist das Licht, das wir heute von ihm empfangen. Diese Rotverschiebung ist eine Größe, die man direkt aus dem Spektrum ablesen kann. Deswegen sprechen die Astronomen oft lieber von Rotverschiebungen als von Entfernungen und Rückschauzeiten, denn diese hängen davon ab, welches kosmologische Modell man benutzt.

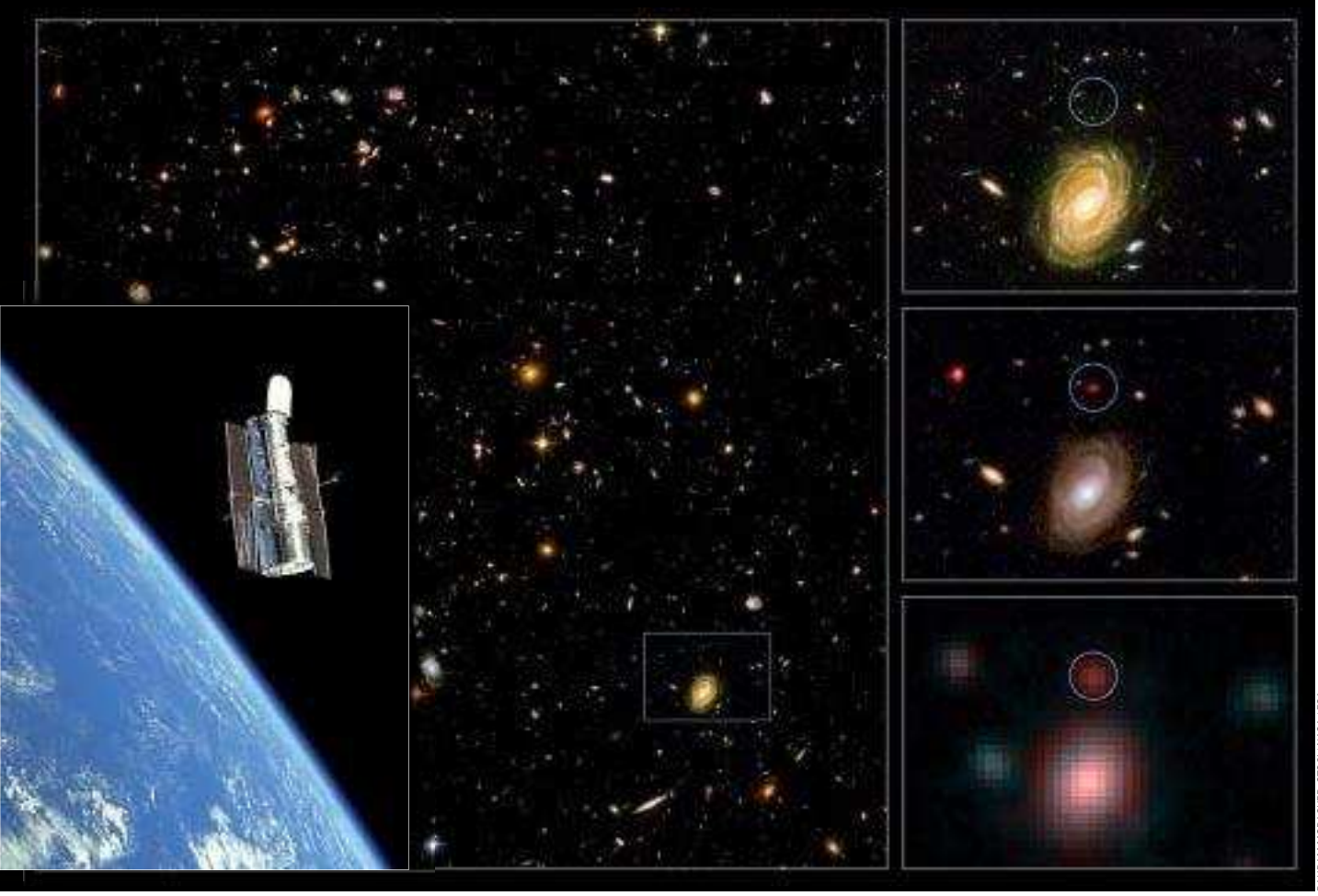
Immerhin: Seit drei Jahren ist der Streit über die richtige Entfernungsskala, der den Astronomen über Jahrzehnte zu schaffen machte, so gut wie beendet. Zu verdanken ist dies der Erkenntnis, dass Messungen der kosmischen Hintergrund-

Die Galaxie JD-2, eine vermutlich äußerst massereiche Galaxie im jungen Universum, wurde von Bahram Mobasher und seinen Kollegen im Hubble Ultra Deep Field entdeckt. Im sichtbaren Licht ist von ihr nichts zu sehen (rechts oben), erst im nahen Infrarot macht sie sich bemerkbar (rechts Mitte und unten).



KLAUS MEISENHEIMER UND DAS COMBO-17/GEMS-TEAM, MPIA / STSCI

Im Projekt Combo-17 bestimmten Astronomen, wie lang das Licht der auf der vorherigen Doppelseite erkennbaren Galaxien unterwegs war. Die Zahlen geben die Rückschauzeiten in Jahrmilliarden an. Als die Erde vor 4,5 Milliarden Jahren entstand, war das Licht der meisten dieser Objekte bereits ausgesandt.



BAHRAM MOBASHER, STSCI / NASA / ESA

strahlung des Nasa-Satelliten WMAP dieselben kosmologischen Parameter ergeben wie völlig unabhängige Beobachtungen mit anderen Satelliten und irdischen Teleskopen. Dieser Befund hat das Vertrauen in das kosmologische Standardmodell gestärkt, auch wenn manche es skeptisch als »Evangelium nach WMAP« bezeichnen.

Lange war es unmöglich, die Rotverschiebung von großen Stichproben entfernter Galaxien zu messen. Damit fehlte der entscheidende Hinweis auf die Entfernung der Objekte und das Alter des empfangenen Lichts. In den letzten fünf Jahren hat sich die Situation grundlegend verbessert. Zum einen verfügen mehrere Großteleskope mit den Multi-Objekt-Spektrografen über Geräte, welche die Spektren von mehreren hundert Objekten gleichzeitig aufnehmen können. Andererseits ist eine Methode zur Messung der Rotverschiebungen, die William Baum von den Observatorien der Carnegie-Institution in Pasadena, Kalifornien, bereits in den 1960er Jahren vorschlug, seit Neuem anwendungsreif. Dabei wird ein Himmelsausschnitt, der viele Galaxien enthält, mit einer Kamera durch eine Reihe von Farbfiltern aufgenommen. Aus den Bildern kann man auf die Spektren der im Bildausschnitt enthaltenen Galaxien und deren Rotverschiebungen schließen.

Klaus Meisenheimer vom Heidelberger Max-Planck-Institut für Astronomie und seinen Kollegen gelang es, die Genauigkeit dieses Verfahrens erheblich zu verbessern (siehe Interview auf S. 59). Gemeinsam mit seinem ehemaligen Studenten Christian Wolf leitet Meisenheimer das Projekt Combo-17, das bereits mehr als 30 000 Galaxien in drei Himmelsausschnitten untersuchte. Combo steht dabei für »Classifying Objects by Medium-Band Observations« – 17 Filter werden dabei benutzt. Als Hans-Walter Rix Direktor am Institut wurde, stieß er zum Projekt dazu und schaffte es, zwei Wochen Beobachtungszeit am Weltraumteleskop Hubble zu ergattern, um eines der Combo-Felder durch zwei Farbfilter zu fotografieren – das Projekt Combo-17/Gems war geboren. Die Hubble-Bilder sind deutlich schärfer als die Aufnahmen irdischer Teleskope. Mit dem kombinierten Datensatz können die Helligkeiten und Spektren der Galaxien mit ihren Formen in Bezug gesetzt werden – und das über einen Zeitraum von 8 Milliarden Jahren. Damit hatten die Heidelberger Forscher ihre Konkurrenz vorerst abgehängt. So ist es kein Wunder, dass mit »Gems« das englische Wort für Juwel den Projektnamen bildet, auch wenn es für »Galaxy Evolution from Morphologies and Spectral Energy Distributions« (Galaxienentwicklung aus ▷

IN KÜRZE

▶ Astronomen erforschen **die Entwicklung der Galaxien** mit lang belichteten Aufnahmen kleiner Himmelsausschnitte. Sie benutzen Satelliten sowie die größten irdischen Teleskope und berücksichtigen alle Spektralregionen. Die Bilder enthalten Licht aus allen Epochen der kosmischen Geschichte.

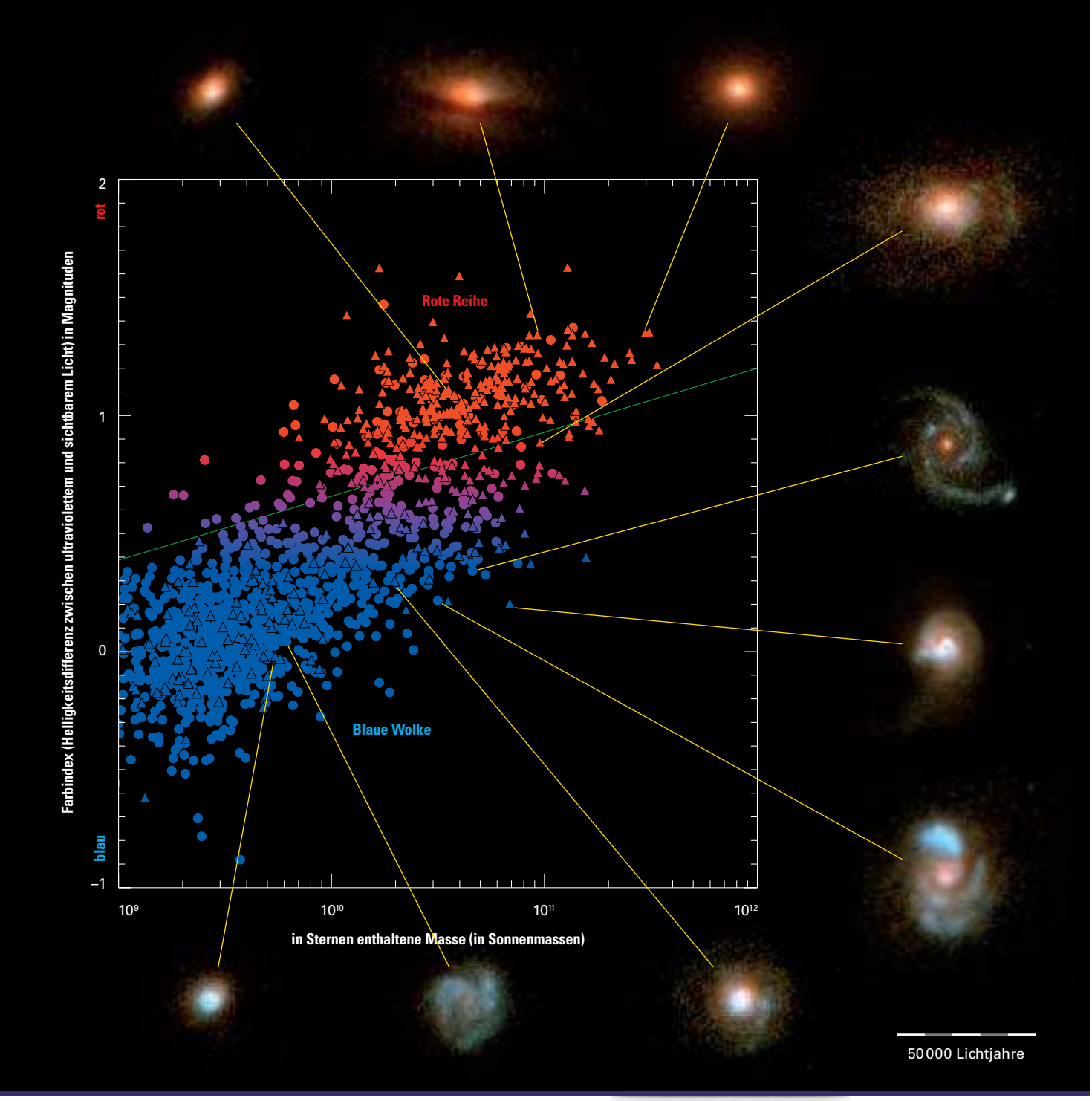
▶ Den Beobachtungen zufolge haben sich die **Orte der Sternentstehung** von massereichen Galaxien zu massearmen verlagert. Manche Galaxien waren bereits eine Milliarde Jahre nach dem Urknall erstaunlich massereich.

▶ Computersimulationen lassen vermuten, dass die Galaxien anwachsen, jedoch ab einer bestimmten Masse keine Sterne mehr bilden – vermutlich eine **Wirkung von Schwarzen Löchern** in ihren Zentren.

Von der Blauen Wolke zur Roten Reihe

Galaxienforscher lieben Diagramme, in denen sie die Farbe der Welteninseln gegen die Masse der darin enthaltenen Sterne auftragen. Die Grafik zeigt solche Messungen von 1500 Galaxien mit Rückschauzeiten zwischen 6,0 und 6,6 Milliarden Jahren, gemessen im Rahmen des Projekts Combo-17/Gems. Dreiecke markieren elliptische, Kreise spiralförmige Galaxien. Die umliegenden Aufnahmen entstanden mit dem Weltraumteleskop Hubble durch Filter, die für orangefarbenes und nahes Infrarotlicht durchlässig sind. Sie zeigen Regionen mit jungen Sternen (blau) sowie die alternden Sternpopulationen (rot), in der zweiten Galaxie oben links ist ein Staubband zu erkennen. Alle Galaxien sind im gleichen Maßstab abgebildet.

Astronomen gehen davon aus, dass sich Galaxien in diesem Diagramm von der »Blauen Wolke« (links unten) zur »Roten Reihe« (rechts oben) entwickeln; ein Hinweis auf die sinkende Rate an Sterngeburten.



MARCO BARDEN UND DAS COMBO-17/GEMS-TEAM, MPIA / STSCI

▷ Morphologien und spektralen Energieverteilungen) steht.

Von solchen Erfolgen abgesehen, war bereits Ende der 1990er Jahre deutlich, dass man bei der Untersuchung der tiefen Felder Ressourcen nicht optimal nutzte. Eine Vielzahl von Arbeitsgruppen beobachtete jeweils ihre eigenen Himmelsausschnitte. Vernünftiger schien es, sich auf zwei Felder zu einigen, eins im Norden und das andere im Süden, diese in allen messbaren Spektralregionen zu studieren und die Daten der gesamten Forschergemeinde zugänglich zu machen. Die Idee für Goods war geboren, den »Great Observatories Origins Deep Survey«, der seit dem Jahr 2000 ein gemeinsames Projekt der Weltraumbehörden Nasa und Esa sowie der Europäischen Südsternwarte (Eso) und der Nationalen Optischen Astronomischen Observatorien in Tucson (Arizona) ist. Das südliche Goods-Feld ist am Himmel 60-mal so groß wie das Hubble Deep Field und in das Feld von Combo-17/Gems eingebettet. Von dieser Region gab es bereits eine tiefe Röntgenaufnahme und neben Hubble wurde sie auch von den Satelliten Spitzer im Infraroten und Galex im Ultravioletten untersucht. Seit Anfang 2004 liegt mit dem Hubble Ultra Deep Field die empfindlichste existierende Himmelsaufnahme im sichtbaren Licht ebenfalls in dieser Region.

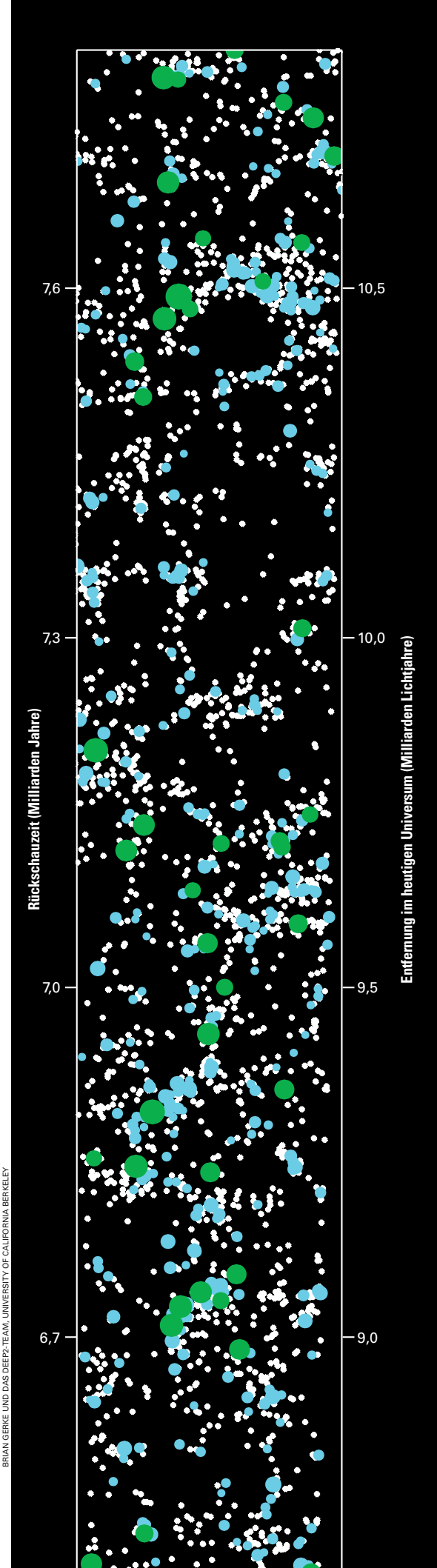
Kosmischer Zoo

Für die Astronomen bedeutet der Trend zu diesen Großprojekten auch einen sozialen Wandel. Früher forschten sie in kleinen Gruppen, doch heute ziehen Dutzende von Mitarbeitern über die ganze Erde verteilt an einem Strang. Als Bahram Mobasher vom Space Telescope Science Institute in Baltimore in Venedig die Liste seiner 29 Koautoren präsentiert, fragt er augenzwinkernd ins Publikum, wer auch noch darauf stehen wolle. Noch mehr Forscher sind am Projekt Goods beteiligt. Ein Heer von Doktoranden versucht derzeit, dessen große Datenmengen zu bändigen. Halbautomatische Computerprogramme, so genannte »Pipelines«, bewältigen dabei einen Teil der Arbeit.

Von einer Himmelsregion auch die Strahlung außerhalb des sichtbaren Lichts zu berücksichtigen, führt zu überraschenden Ergebnissen. Viele entfernte Galaxien sind im sichtbaren Licht nicht zu erkennen und wären übersehen worden, wenn sie nicht bei längeren Wellenlängen im Infraroten oder im Millimeter-Radiobereich überraschend hell wären, darunter das von Mobasher und seinen Kollegen gefundene Objekt JD-2. Andererseits gibt es mit den so genannten Exos Objekte, die zwar im kurzwelligen Röntgenbereich leuchten, im sichtbaren Spektralbereich jedoch kaum auffallen. Als Verursacher werden Schwarze Löcher vermutet, die sich in den Zentren staubreicher Galaxien befinden.

Den beobachtenden Kosmologen geht es ähnlich wie den Naturforschern des 18. Jahrhunderts, die bei ihren Expeditionen ins Unbekannte auf eine Vielzahl neuer Tiere und Pflanzen stießen. Astronomen benennen zuvor unbekannte Galaxienarten nach der Spektralregion, in der die Objekte am hellsten sind, der benutzten Suchtechnik oder dem Detektor, mit dem die Entdeckung gelang. Dabei entsteht ein extragalaktischer Zoo, über den die Forscher oft selbst schmunzeln müssen. So gibt es neben den ultraleuchtkräftigen Infrarot- und den Millimeter-Galaxien (auffällige Spektralregion) die BzK-, Lyman-Break- sowie Balmer-Break-Galaxien (Suchtechniken), des Weiteren die Scuba- und Mambo-Galaxien (Detektoren), von Entfernten Roten Galaxien, Extrem Roten Objekten, den Eros, und den Hyper-Eros einmal ganz abgesehen. Immer wieder stellt sich heraus, dass verschiedene Namen dieselben Objekten beschreiben, und so ist das Bereinigen der Nomenklatur eine wichtige Stufe des Erkenntnisprozesses.

Die in Goods und Combo-17/Gems beobachteten Himmelsregionen sind zu klein, um den Einfluss kosmologischer Strukturen wie Galaxienhaufen, Voids (großen Leerräumen) und Filamenten (fadenförmigen Verbindungen zwischen den Haufen) auf die Entwicklung ▷



BRIAN GERKE UND DAS DEEP2-TEAM, UNIVERSITY OF CALIFORNIA BERKELEY

Im Projekt Deep2 haben Astronomen der Universität von Kalifornien mit dem Zehn-Meter-Keck-Teleskop auf Hawaii Gruppen von Galaxien bis zu einer Entfernung von mehr als 10 Milliarden Lichtjahren nachgewiesen. Hier sind einzelne Galaxien als weiße Punkte, kleine Gruppen als blaue Kreise und größere Gruppen als grüne Kreise dargestellt. Ihre Verteilung zeigt Häufungen und Leerräume.

▷ der Welteninseln zu erfassen. Seit den 1970er Jahren ist bekannt, dass in dicht bevölkerten Regionen des Kosmos mehr elliptische, rote, in dünn besiedelten jedoch eher blaue, spiralförmige Galaxien existieren.

Um diesem Zusammenhang genauer auf die Spur zu kommen, wurde 2002 Cosmos gegründet, der Cosmic Evolution Survey, an dem sich inzwischen mehr als hundert Wissenschaftler aus neun Ländern beteiligen (siehe Kasten auf S. 60). Nicholas Scoville vom California Institute of Technology in Pasadena ist es gelungen, zuvor noch konkurrierende Arbeitsgruppen einzuspannen. Der Zeitaufwand für die Beobachtung des Cosmos-Felds, so groß wie neun Vollmonde, lässt auch kaum eine andere Wahl.

Dennoch gibt es Konkurrenz, und für Cosmos ist das vor allem Deep2, ein Projekt von Astronomen der Universität von Kalifornien in Berkeley und Santa Cruz. Ab und zu messen Vertreter beider Projekte in Diskussionen ihre Kräfte: Wer beobachtet mehr Galaxien? Wer hat die empfindlicheren Daten? Und wer misst die Rotverschiebungen genauer? Weil Deep2 ein Feld am nördlichen Himmel untersucht, gibt ihm Scoville keine Zukunft: »Die wichtigsten Teleskope der Zukunft werden auf der Südhalbkugel stehen, von dort muss man ein Feld sehen können.« Er denkt vor allem an Alma, ein Netzwerk von Antennen für den Nachweis von Millimeter-Radiostrahlung, das in der chilenischen Atacamawüste errichtet wird und 2011 in Betrieb gehen soll. Das Cosmos-Feld liegt am Himmelsäquator und ist allen Teleskopen der Erde zugänglich.

Galaktische Archäologie

Andererseits ergeben sich auch neue Kooperationen. Binnen kurzer Zeit sind japanische Astronomen zu begehrten Partnern geworden. Das verdanken sie ihrem Teleskop Subaru auf Hawaii und dessen Gerät SuprimeCam. Kein anderes Großteleskop verfügt über eine derart leistungsfähige Weitwinkelkamera – ein Vorteil, um das große Cosmos-Feld abzudecken. »Dank Subaru sind wir international dabei, und darüber bin ich sehr froh«, sagt Taniguchi.

Rückschaustudien bieten nicht die einzige Möglichkeit, um die Entwicklung der Galaxien zu untersuchen. Galaktische Archäologen suchen in nahen Welteninseln nach Hinweisen auf deren Vergangenheit. Einer von ihnen ist Thomas Brown vom Space Telescope Science Institute in Baltimore. Zusammen mit Kollegen hat auch er eine tiefe Aufnahme des Himmels gemacht: Dreieinhalb Tage belichteten sie mit dem Weltraumteleskop Hubble eine winzige Stelle am Rand der Andromeda-Galaxie, die im Abstand von zwei Millionen Lichtjahren ein Nachbar unserer Milchstraße ist. Von 300 000 ihrer Sterne bestimmten sie Helligkeiten und Farben und konnten so zeigen, dass sie eine bewegte Vergangenheit hat. Zwei Drittel dieser Sterne sind mit 12 Milliarden Jahren ungefähr so alt wie die unserer Milchstraße. Ein Drittel ist jedoch nur etwa 6 bis 8 Milliarden Jahren alt und unterscheidet sich in seiner chemischen Zusammensetzung von den älteren Sternen – diese sind in einer ▷

ALLE FOTOS: GÖTZ HOEPPE

Impressionen vom Tagungsort, dem Palazzo Cavalli Franchetti (oben): Yoshiaki Taniguchi hält den Rekord für die Entdeckung der entferntesten Galaxie, Avishai Dekel aus Jerusalem begrüßt Rodger Thompson (rechts) aus Tucson, der die Infrarotkamera des Hubble-Teleskops entwarf, Alvio Renzini moderiert (unten rechts).

Acht Milliarden Jahre im Leben des Kosmos

Klaus Meisenheimer und seine Mitarbeiter vom Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg messen seit 1999 in fünf Himmelsausschnitten die Strahlung und die Entfernungen von mehreren zehntausend Galaxien – eine ideale Quelle, um die Entwicklung dieser Welteninseln im Verlauf der letzten acht Milliarden Jahre zu untersuchen. Während die meisten anderen Durchmusterungen Teleskope der Acht-Meter-Klasse benutzen, beobachten die Heidelberger Astronomen »nur« mit einem 2,2-Meter- und einem 3,5-Meter-Instrument. Dass sie trotzdem die Nase vorn haben, verdanken sie einer innovativen Beobachtungstechnik.

Spektrum: Herr Professor Meisenheimer, in Lehrbüchern steht, dass man zur Messung der Fluchtgeschwindigkeit das Spektrum der Galaxie mit einem Spektrografen aufnehmen muss, um die Rotverschiebung der Spektrallinien zu bestimmen. Damit kann man auf die Entfernung der Galaxien und das Alter des Lichts schließen. Sie bestimmen die Rotverschiebung, indem Sie die Galaxien durch verschiedene Farbfilter fotografieren. Wie machen Sie das?

Meisenheimer: Seit 1994 habe ich an Cadis gearbeitet, einem Projekt, in dem wir verschiedene Methoden für die Suche nach entfernten Galaxien ausprobierten. Dabei benutzten wir Filter, die nur das Licht in einem schmalen Wellenlängenbereich, also einer bestimmten Farbe, durchlassen. Entfernte, junge Galaxien, in denen viele Sterne entstehen, leuchten vor allem im Licht bestimmter Emissionslinien. Durch die kosmologische Rotverschiebung wird deren Wellenlänge gedehnt, und zwar umso mehr, je weiter die Galaxien von uns entfernt sind. Deshalb können wir mit den Schmalbandfiltern gezielt nach Galaxien in einer bestimmten Entfernung suchen.

Allerdings müssen wir die Spreu vom Weizen trennen, weil wir durch einen einzigen Filter in einem Himmelsausschnitt nicht nur entfernte Galaxien sehen, sondern auch andere, nähere und sogar manche Sterne unserer Milchstraße. Mit sorgfältig ausgewählten, zusätzlichen Filtern können wir die entfernten Galaxien von näheren Objekten unterscheiden.

Spektrum: Ihr Projekt Combo-17 ist die erste Durchmusterung, in der auf diese Weise Rotverschiebungen von Tausenden von Galaxien gemessen werden. Wie sind Sie vorgegangen?

Meisenheimer: Im Jahr 1997 begann ich, eine Weitwinkelkamera für das 2,2-Meter-Teleskop der Europäischen Südsternwarte auf La Silla (Chile) zu entwickeln. Damals hatte ich bereits vor, die Filtertechnik für ein größeres Projekt zu nutzen, und habe deshalb Halterungen für 50 Filter eingebaut. Gemeinsam mit Christian Wolf, der heute an der Universität Oxford arbeitet, plante ich nach Quasaren zu suchen, einer Art aktiver galaktischer Kerne. Und mit Kollegen von der Königlichen Sternwarte in Edinburgh wollte ich den schwachen Gravitationslinseneffekt studieren, bei dem Gravitationsfelder die Bilder entfernter Galaxien verzerren. Diese beiden Projekte ergaben zusammen Combo-17, ein Projekt, in dem wir fünf Felder untersuchen. Die Beobachtungen von drei Feldern sind inzwischen abgeschlossen.

Spektrum: Für eines davon haben Sie bereits Daten des 2,2-Meter-Teleskops in Chile mit dem Weltraumteleskop Hubble kombiniert ...

GÖTZ HOEPPE

Klaus Meisenheimer

Meisenheimer: Das ist das Feld im südlichen Chandra Deep Field, von dem es schon eine lang belichtete Röntgenaufnahme gab. Damals arbeitete Jiasheng Huang bei uns in Heidelberg. Er wechselte später an das Datenzentrum des Infrarotsatelliten Spitzer. Christian Wolf und ich sagten zu ihm: »Wir nehmen das Feld mit Combo-17 unter die Lupe und ihr schaut es euch mit Spitzer an!« Später wurde dieser Himmelsausschnitt als eines der Goods-Felder ausgewählt, dessen Umgebung wir mit Gems beobachteten. Auch das Hubble Ultra Deep Field, die tiefste Aufnahme überhaupt, wurde dann hier gemacht.

Dass wir diese Region ausgewählt haben, hänge ich nicht an die große Glocke. Das würde mir ja doch keiner glauben, dass so ein paar Typen in Deutschland die ganze Astronomie auf ein kleines Feld am Himmel gelockt haben. (lacht)

Spektrum: Derzeit hat kein anderes Team so viele Rotverschiebungen entfernter Galaxien gemessen wie Ihre Gruppe. Wie steht es um die Konkurrenz?

Meisenheimer: Als wir 1999 mit Combo-17 anfingen, plante eine französisch-italienische Gruppe, mit dem Acht-Meter-Very-Large-Telescope der Europäischen Südsternwarte mit einem neuen Spektrografen 100 000 Rotverschiebungen zu bestimmen. Da habe ich gesagt: Die hängen wir ab! Wenn wir jetzt mit voller Kraft loslegen, dann machen wir die ganze Wissenschaft mit einem kleineren Teleskop und weniger Beobachtungszeit und sind trotzdem zwei Jahre früher fertig! Tatsächlich hatten wir unsere Daten zusammen, bevor diese Gruppe überhaupt angefangen hat.

Viele der Beobachtungen machte ich selbst. Auf La Silla habe ich mit dem Wetter immer Glück. Wenn ich dort ankomme, dann verschwindet die letzte Wolke am Himmel. Und wenn ich in den Bus steige, um wieder abzufahren, dann kommen die Wolken zurück. Aber wenn ich da bin, herrscht bestes Wetter und ich kann beobachten, so lange ich will! (lacht)

Bald haben mehrere Projekte jeweils 50 000 spektroskopische Rotverschiebungen zusammen, und dann haben wir ein Problem. Auf dieser Tagung staune ich darüber, wie gut wir noch dastehen. Ich dachte, wir gehören schon zum alten Eisen!

Spektrum: Was kommt nach Combo-17?

Meisenheimer: Jetzt ist Combo-17+4 angesagt. Vor zwei Jahren haben wir begonnen, drei unserer Felder zusätzlich durch vier Filter im nahen Infrarotlicht zu beobachten. Auf diese Weise wollen wir Galaxien in noch größerer Entfernung erkennen. Das funktioniert, doch leider hatten wir bis jetzt kein Glück mit dem Wetter, denn von 35 Nächten waren nur sechs klar. Ich hoffe, dass wir in einem Jahr unsere Daten zusammenhaben. Wir hätten dann 5000 bis 10 000 weitere Galaxien, die wir bis zu 9,5 Milliarden Jahre in der Vergangenheit sehen. Damit wären wir wieder absolut konkurrenzlos, fürs Erste zumindest.

Der Cosmic Evolution Survey

Im Projekt Cosmos haben sich mehr als einhundert Wissenschaftler aus den USA, Kanada, Frankreich, Italien, der Schweiz, Großbritannien, Deutschland, Südafrika und Japan zusammengetan, um zu erforschen, wie kosmische Strukturen auf die Evolution von Galaxien einwirken. Sie untersuchen eine Himmelsregion im Sternbild Sextant, die mit einer Fläche von neun Vollmonden größer ist als jedes andere tiefe Feld. Grundlage ihrer Arbeit ist eine optische Aufnahme, die mit dem Weltraumteleskop Hubble aufgenommen wurde. Der Projektleiter ist Nicholas Scoville, Professor am California Institute for Technology in Pasadena.

Spektrum: Herr Professor Scoville, als Radioastronom haben Sie sich mit Molekülen in Galaxien beschäftigt, doch nun leiten Sie mit dem Projekt Cosmos die weltweit größte kosmologische Tiefendurchmusterung. Was hat Sie dazu gebracht?

Scoville: Im Oktober 2002 fragte mich Steve Beckwith, der damals das Space Telescope Science Institute leitete und somit der wissenschaftliche Direktor des Weltraumteleskops Hubble war, ob ich ihm helfen könne, die Pläne für zukünftige kosmologische Untersuchungen mit diesem Instrument zu begutachten. Steve lud eine Gruppe von Astronomen nach Baltimore ein, um darüber zu diskutieren. Ich kenne ihn seit unserer gemeinsamen Zeit am California Institute of Technology in den 1970er Jahren, und außerdem bin ich Mitglied in Rodger Thompsons Team für die Infrarotkamera von Hubble.

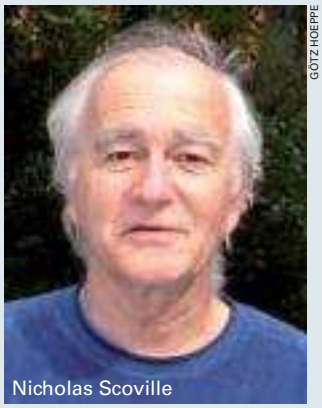
Damals waren die Beobachtungen des Hubble Ultra Deep Field im Gange, wobei ein kleiner Himmelsausschnitt durch fünf Filter für jeweils 80 Erdumläufe des Satelliten beobachtet wurde. Insgesamt wurde diese Region mehr als zwei Wochen lang belichtet und es war klar, dass man mit der existierenden Technik nicht tiefer sehen kann. Da lag es nahe, im nächsten Schritt einen größeren Himmelsausschnitt zu beobachten.

Spektrum: Was versprechen Sie sich davon?

Scoville: Wir wissen, dass das Universum vor sieben bis neun Milliarden Jahren im Umbruch war. Damals wurden die meisten Sterne gebildet und die Galaxien nahmen mehr oder weniger ihre heutige Gestalt an. Auch die Unterscheidung in Galaxienhaufen und dünn besiedelte Regionen war damals bereits weit fortgeschritten. Aus einer Entfernung von sieben bis neun Milliarden Lichtjahren betrachtet, erstrecken sich solche großräumigen Strukturen über ein bis zwei Grad, was am Himmel dem zwei- bis vierfachen Durchmesser des Vollmonds entspricht. Deshalb schlug ich vor, ein Feld zu beobachten, das zwei Quadratgrad groß ist, also der Fläche von neun Vollmonden entspricht. Mit einem so großen Feld können wir nicht nur die kosmischen Strukturen erfassen, sondern haben ganz einfach auch viele Galaxien im Blick. Das ist wichtig, um deren Evolution lückenlos aufzuklären.

Spektrum: Inzwischen machen mehr als 100 Wissenschaftler in den USA, Europa und Japan bei Cosmos mit. Wie haben Sie die zusammengeführt?

Scoville: Zunächst einmal hat meine Idee den Teilnehmern des Treffens in Baltimore gefallen, und da ich die Idee hatte, wurde ich automatisch zum Leiter bestimmt. Es ist mein Stil, Wissenschaftler in ein Team zu integrieren, anstatt auf die Konkurrenz mit anderen Teams zu setzen. Ich wurde als jemand angesehen, der das Team nicht dominieren würde. Wenn man einen so großen Himmelsausschnitt beobachten will, ist das wichtig, denn man muss alle verfügbaren Ressourcen bündeln. Um die Entwicklung von Galaxien zu studieren, brauchen wir Daten in allen Wellenlängen, vom Röntgenlicht bis zur Radiostrahlung.


GÖTZ HOEPPE

Nicholas Scoville

Eine andere wichtige Person bei dem Treffen war Alvio Renzini, der damals noch an der Europäischen Südsternwarte arbeitete. Wir kannten uns schon vorher und so bat ich ihn, den europäischen Teil der Kollaboration zu koordinieren.

Der Kern unserer Daten ist die Hubble-Aufnahme. Es ist das größte Bild, das jemals mit diesem Teleskop gemacht wurde, außerdem kamen bald die Röntgen- und Infrarotdaten hinzu. Dass wir bereits solche einzigartigen Daten haben, macht es für andere Astronomen attraktiv, bei uns einzusteigen.

Spektrum: Wie hält man ein so großes Projekt zusammen?

Scoville: Manche sagen, dass wir ein Team von Teams sind. Genau genommen sind wir natürlich ein Projekt, aber darin gibt es mehrere Brennpunkte. Zum Beispiel koordiniert Günther Hasinger am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik in Garching die Röntgendaten des Satelliten XMM-Newton, Yoshiaki Taniguchi organisiert die optischen Beobachtungen des Teleskops Subaru und Eva Schinnerer vom Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg die Radiobeobachtungen. Diese Arbeitsgruppen können ihre Daten zuerst für sich auswerten und damit wissenschaftlich arbeiten, während das Hubble-Bild und die Rotverschiebungen sofort dem ganzen Team zur Verfügung stehen. Alle Daten sind ein Jahr lang für die Mitglieder reserviert. Dann werden sie öffentlich gemacht und alle Wissenschaftler können sie benutzen.

So eine Arbeit verläuft nicht immer ohne Spannungen. Es ist vorgekommen, dass sich ein Team innerhalb von Cosmos ganz schön Zeit ließ, seine Daten an die Kollegen weiterzuleiten. Außerdem wünsche ich mir, dass die Mitglieder von Cosmos zusammenarbeiten, wenn sie dasselbe Thema erforschen. Leider machen sie das nicht immer.

Spektrum: Wenn Sie an Ihren Start in die Forschung zurückdenken: Was hat sich daran geändert, ein Astronom zu sein?

Scoville: Manches ist besser geworden. Jetzt sind die Instrumente empfindlicher und die Daten einfach fantastisch. Wenn man aber gern individuell arbeitet, dann ist es nicht mehr so schön, denn jeder ist Teil eines riesigen Teams. Früher sind wir zu zweit oder zu dritt zum Teleskop gefahren. Da konnten wir unsere Pläne spontan ändern und ein neues Gerät ausprobieren oder ein anderes Objekt beobachten. Heute sind die Bedingungen fast immer gut, aber es kommt kaum noch vor, dass man plötzlich eine große Entdeckung macht. Entdeckungen sind nun meist Ergebnisse statistischer Analysen.

ANZEIGE

▷ anderen Galaxie entstanden. Die Forscher deuten die Beobachtungen als Hinweis auf einen Zusammenstoß zweier Welteninseln oder einen Akt des Kannibalismus, bei dem sich die dominierende Andromeda-Galaxie eine kleinere einverleibt hat.

Solche Zusammenstöße können Phasen intensiver Sternentstehung auslösen, so genannte Starbursts, die oft nur wenige Millionen Jahre andauern und eine neue Sternpopulation hervorbringen. Ist das Gas aufgebraucht, werden keine Sterne mehr gebildet und die im Burst geborenen altern: Das von den Sternen der Galaxie ausgesandte Licht wird röter und schwächer. Möglich sind aber auch »trockene« Verschmelzungen, in denen kein Gas zur Sternentstehung vorhanden ist. In beiden Fällen ist das Ergebnis des kosmischen Zusammenstoßes langfristig eine massereiche, rote Galaxie – ein Mitglied der Roten Reihe.

Rätselhafte Gastrophysik

Zunächst dachten die Astronomen, dass sich die Existenz der Roten Reihe auf diese Weise unmittelbar ergibt. Seitdem sie mit Hilfe der neuen Daten die Rate der galaktischen Zusammenstöße direkt abzählen, müssen sie jedoch erkennen, dass sie so nur ein Drittel der galaktischen Errötung erklären können. Es ist zur Aufgabe der Theoretiker geworden, Prozesse zu suchen, welche die Sternentstehung in Galaxien nach einer intensiven Phase abschalten.

Rachel Somerville vom Max-Planck-Institut für Astronomie fiel auf, dass sich die beobachtete Häufigkeit roter Galaxien ergibt, wenn die Sternentstehung in Galaxien aufhört, sobald diese eine bestimmte Masse überschritten haben. Womöglich kann dieser Befund in das klassische Modell der Galaxienentstehung integriert werden. Davon ist zumindest Avishai Dekel von der Hebräischen Universität Jerusalem überzeugt.

Die klassische Theorie geht davon aus, dass im Urknall »normale« Materie aus Atomkernen sowie die noch rätselhafte Dunkle Materie entstanden. Die räumliche Dichte der beiden Materiearten schwankte zunächst von Ort zu Ort. Obwohl sich das Universum ausdehnte und die Dichte der Materie verdünnte, bildeten sich einzelne Verdichtungen, deren dunkle Masse ausreichte, um auf Grund der Schwerkraft zu kontrahieren. Es bildeten sich Gravitationspotenziale, in die normale Materie aus der Umgebung hineinströmte, insbesondere auch das im Urknall entstandene Wasserstoff- und Heliumgas, das Baumaterial der Sterne. So entstanden die Protogalaxien.

Vor wenigen Jahren wurde das Supernova-Feed-back als ein Prozess erkannt, der die Sternentstehung abschaltet. Tatsächlich können diese gewaltigen Sternexplosionen das Gas erhitzen und sogar aus den Gravitationspotenzialen drängen – doch das scheint nur bei kleineren Galaxien zu funktionieren.

Fast jede Galaxie hat ein Schwarzes Loch im Zentrum, und dessen Aktivität unterbindet die Sternentstehung. Sobald dort Gas hineinströmt, wird energiereiche Strahlung frei und es können zwei Gasstrahlen (Jets) entstehen, die sich an den Polen ausbilden und das interstellare Medium aufwühlen. Das wiederum unterdrückt die Geburt weiterer Sterne. Darüber hinaus bilden sich beim Einfall von Gas in das Gravitationspotenzial einer massereichen Galaxie Stoßwellen aus, die ebenfalls das Gas erhitzen und so dessen Verdichtung zu Sternen verhindern.

Somerville und Dekel sind sich darin einig, dass Wechselwirkungen zwischen dem Gravitationspotenzial, Sternen, Gas und dem zentralen Schwarzen Loch die Eigenschaften der Galaxienpopulation prägen. Doch diese »Gastrophysik« ist kompliziert und lässt sich nur im Wechselspiel von Simulationsrechnungen und Beobachtungen allmählich entziffern. Dekel bedauert: »Vom Universum habe ich keine Ahnung. Ich kenne nur meinen Computer!« – und erregt so das Mitgefühl der Beobachter.

Besonders fasziniert sind die Forscher von den massereichen Galaxien im jungen Universum. Astronomen wissen, dass die Welteninseln durch Zusammenstöße und Kannibalismus über Milliarden von Jahren anwachsen. Dass schon eine Milliarde Jahre nach dem Urknall Objekte wie JD-2 existierten, scheint dem zu widersprechen. »Wenn unsere Beobachtungen ein Problem für das kosmologische Standardmodell sind, warum habt ihr Theoretiker uns das nicht längst gesagt?«, wirft Patrick McCarthy von den Observatorien der Carnegie-Institution schelmisch in die Runde. Dekel beruhigt die Gemüter seiner Kollegen mit dem Hinweis, dass im Standardmodell massereiche Strukturen zuerst zu Galaxien kollabieren – masseärmere folgen später.

Deswegen stehen die neuen Beobachtungen zwar nicht unbedingt im Widerspruch dazu. Doch auch Dekel hält die Existenz massereicher Galaxien im jungen Universum für einen wichtigen Prüfstein des Standardmodells. Ob sie dieses erschüttern können, werden die Astronomen vielleicht erst bei ihrem nächsten Treffen in Venedig diskutieren. ◁

NATIONAL ASTRONOMICAL OBSERVATORY OF JAPAN

Das japanische Acht-Meter-Teleskop Subaru auf dem Mauna Kea (Hawaii) ist mit seiner Weitwinkelkamera SuprimeCam für die Beobachtung der tiefen Felder bestens geeignet.

Götz Hoeppe ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Zehntausende Galaxien auf einen Blick. Von Klaus Meisenheimer und Christian Wolf in: Sterne und Weltraum 1/2002, S. 22

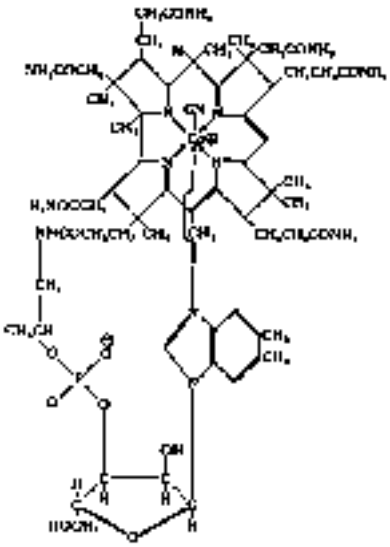
Evidence for a massive, post-starburst galaxy at z = 6.5. Von Bahram Mobasher et al. in: Astrophysical Journal, Bd. 635, S. 832, 2005

High-redshift galaxy populations. Von Esther M. Hu und Lennox Cowie in: Nature, Bd. 440, S. 1145, 2006

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

WISSENSCHAFT IM RÜCKBLICK

1956



▲ Strukturformel des Vitamins B_{12}

Grünes Licht fürs Überholen

»Eine Firma hat ein Gerät entwickelt, wodurch das Ueberholen zu einer harmlosen Sache wird. Es ist nur für LKWs und Busse vorgesehen. Der Fahrer, der überholen will, gibt ein Zeichen mit seinem Fernlicht auf das Gerät und löst ein gelbes Licht am Wagenende aus. Im gleichen Moment ertönt im Führerhaus des vor ihm Fahrenden ein kurzes Glockenzeichen, und am Armaturenbrett erscheint ein rotes Licht. Der Fahrer weiß nun, dass ein anderes Fahrzeug ihn überholen will. Der vorausfahrende LKW-Fahrer, der durch den erhöhten Sitz die Strasse besser übersehen kann, gibt bei freier Strasse das Freifahrtszeichen mit grünem Licht.« *Neuheiten und Erfindungen, 23. Jg., Nr. 261, S. 140, Juli/August 1956*

Vitamin B_{12} entschlüsselt

»Die chemische Konstitution des Vitamins B_{12} konnte jetzt weitgehend aufgeklärt werden. Dabei wurde ein kristallines Abbauprodukt des Vitamins einer Röntgenstrahlanalyse unterworfen, deren Ergebnisse mit Hilfe der zweitgrößten, in Los Angeles aufgestellten elektronischen Rechenmaschine ausgewertet wurden. So konnte im Laufe eines Jahres eine Strukturformel für das Vitamin berechnet werden. Es handelt sich um ein System von Pyrrolringen, das bei deutlichen Unterschieden eine große Ähnlichkeit mit dem Molekül des roten Blutfarbstoffs zeigt. Das Zentralatom ist jedoch nicht Eisen wie beim letzteren, sondern Kobalt.« *Die Umschau, 56. Jg., Nr. 14, S. 439, Juli 1956*

Radio Jupiter

»Kurzwellen vom Planeten Jupiter werden seit Januar 1955 bei einer Frequenz von 22,2 Megahertz (= 13,3 Meter) vom Carnegie Institut (Washington) empfangen … Die Radiostrahlung des Planeten besitzt keine konstante Intensität, sondern besteht aus häufigen Impulsen, die jeweils nur Bruchteile von Sekunden dauern. Die Spitzenintensitäten liegen in der Größenordnung 10^{-22} Watt/m² Hz und übertreffen gelegentlich die intensivste kosmische Radioquelle Cassiopeia A, deren Intensität bei 22 Megahertz $8 \cdot 10^{-22}$ Watt/m² Hz beträgt. Hieraus muß geschlossen werden, daß das Radiospektrum des Jupiter allgemein nach hohen Frequenzen hin sehr steil abfällt.« *Die Umschau, 56. Jg., Nr. 14, S. 439, Juli 1956*

Erschöpfendes Weinen, triumphierendes Lachen

»Reflexe erfüllen ursprünglich einen nützlichen Zweck: … Das Weinen, das bei Tieren nur bei körperlichem, beim Menschen auch bei seelischem Schmerz vorkommt, ist ursprünglich ein Überleiten sensibler Nervenspannung auf motorische und sekretorische Nervenäste. Das Weinen und das Schluchzen ist zweckmässig, da es eine wohltuende Erschöpfung hervorruft. Das Lachen der Menschen … ist ursprünglich ein Triumphgeschrei über einen schwächeren Feind, dem mit aufgerissenen Augen und Maul entgegengetreten wird. Alles in allem sind die menschlichen Reflexe dieselben wie die der Tiere, wenn sie sich auch vielfach modifiziert haben.« *Die Umschau, 10. Jg., Nr. 31, S. 614, Juli 1906*

Gute Passform für besseres Hören

»Die neuen Apparate für schwerhörige Personen sind Verbesserungen der bekannten künstlichen Trommelfelle sowie des Watteträgers. Die Schallübertragung mit diesen älteren Apparaten war infolge der bedeutenden Schieflage des Trommelfells zur Gehörgangsachse und auch wegen andrer Ursachen eine mangelhafte. Der Kontakt war meist unvollständig und wurde leicht unterbrochen, wodurch naturgemäß eine wesentliche Beeinträchtigung der Schallübertragung erfolgen musste. Die neuen Apparate beseitigen diesen Uebelstand und bestehen im wesentlichen aus einem dünnwandigen Säckchen von Weichgummi, welches in seiner äusseren Form dem Abguss des natürlichen menschlichen Gehörgangs bis zum Trommelfell gleicht.« *Deutsche Export-Revue, 6. Jg., Nr. 8, S. 287, Juli 1956*

Splitter elektromagnetisch entfernen

»Es ist schon seit Jahren Gebrauch von starken Elektromagneten gemacht worden, um kleine Eisensplitter aus dem Auge zu entfernen. Bedeutend weiter ist ein amerikanischer Arzt gegangen. Er hat einen kolossalen Elektromagneten von vier Fuß Länge und sechs Zoll Dicke aufstellen lassen, der unter der Einwirkung von 30 Ampere aus der öffentlichen Elektrizitätsleitung ein so gewaltiges magnetisches Feld besitzt, daß eine Person, die den Kopf daran lehnt, selbst zum Magneten wird. Bringt man das Auge mit genügender Vorsicht dicht an das spitze Polende dieses Magneten, so zieht er bei ganz mäßiger Anstellung des Stromes eingedrungene Eisenteilchen heraus, selbst solche, die ziemlich tief sitzen und nicht sichtbar sind, folgen fast immer dem magnetischen Zuge.« *Jahrbuch der Erfindungen, 6. Jg., S. 252, 1906*

1906

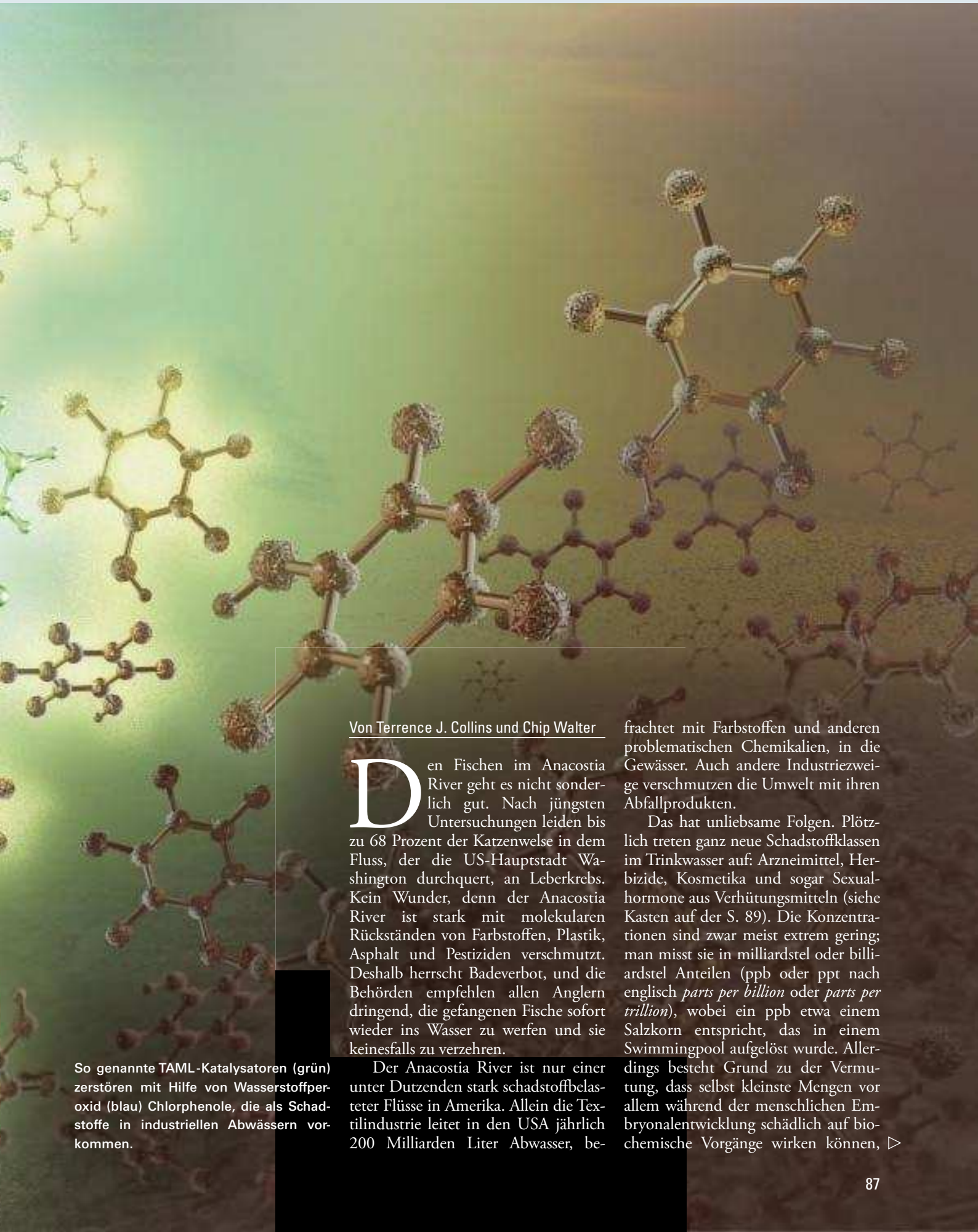
▲ Mit Hilfe dieses Elektromagneten lassen sich Eisensplitter aus dem Auge entfernen.

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen, siehe: www.spektrum.de/audio

Kleine künstliche Schadstoffkiller

Eine neue Klasse von Katalysatoren kann selbst hartnäckigste Verunreinigungen in industriellen Abwässern zerstören, bevor sie in die Umwelt gelangen.

JEAN-FRANÇOIS PODEVIN



So genannte TAML-Katalysatoren (grün) zerstören mit Hilfe von Wasserstoffperoxid (blau) Chlorphenole, die als Schadstoffe in industriellen Abwässern vorkommen.

Von Terrence J. Collins und Chip Walter

Den Fischen im Anacostia River geht es nicht sonderlich gut. Nach jüngsten Untersuchungen leiden bis zu 68 Prozent der Katzenwelse in dem Fluss, der die US-Hauptstadt Washington durchquert, an Leberkrebs. Kein Wunder, denn der Anacostia River ist stark mit molekularen Rückständen von Farbstoffen, Plastik, Asphalt und Pestiziden verschmutzt. Deshalb herrscht Badeverbot, und die Behörden empfehlen allen Anglern dringend, die gefangenen Fische sofort wieder ins Wasser zu werfen und sie keinesfalls zu verzehren.

Der Anacostia River ist nur einer unter Dutzenden stark schadstoffbelasteter Flüsse in Amerika. Allein die Textilindustrie leitet in den USA jährlich 200 Milliarden Liter Abwasser, befrachtet mit Farbstoffen und anderen problematischen Chemikalien, in die Gewässer. Auch andere Industriezweige verschmutzen die Umwelt mit ihren Abfallprodukten.

Das hat unliebsame Folgen. Plötzlich treten ganz neue Schadstoffklassen im Trinkwasser auf: Arzneimittel, Herbizide, Kosmetika und sogar Sexualhormone aus Verhütungsmitteln (siehe Kasten auf der S. 89). Die Konzentrationen sind zwar meist extrem gering; man misst sie in milliardstel oder billiardstel Anteilen (ppb oder ppt nach englisch *parts per billion* oder *parts per trillion*), wobei ein ppb etwa einem Salzkorn entspricht, das in einem Swimmingpool aufgelöst wurde. Allerdings besteht Grund zu der Vermutung, dass selbst kleinste Mengen vor allem während der menschlichen Embryonalentwicklung schädlich auf biochemische Vorgänge wirken können, ▷

▷ durch die Verhalten, Intelligenz, Immunsystem und Reproduktionsfähigkeit beeinflusst werden.

Immerhin gibt es intensive Bemühungen um Abhilfe. Eine erste Maßnahme war der Bau von Kläranlagen, in denen Bakterien einen Großteil der Schadstoffe im Abwasser zersetzen. Dadurch ließ sich die Gewässerqualität in den letzten Jahrzehnten schon erheblich verbessern. Außerdem ist das junge Gebiet der grünen Chemie entstanden. Hier haben Forscher in den vergangenen zehn Jahren damit begonnen, chemische Produkte und Prozesse umweltfreundlicher zu gestalten. Dabei suchten sie Wege, schädliche Farb- und Kunststoffe durch harmlose Substanzen zu ersetzen, und entwickelten neue Herstellungsverfahren, bei denen weniger Schadstoffe anfallen – getreu der Maxime des Instituts für Grüne Chemie der American Chemical Society: »Abfall zu vermeiden ist besser, als ihn nachträglich zu beseitigen.« Daneben wurden aber auch Möglichkeiten erforscht, Abwasser kostengünstig von schwer abbaubaren Schadstoffen zu reinigen.

Anleihe bei Enzymen

Ein Beispiel dafür ist die Entwicklung einer Gruppe von Designer-Katalysatoren am Institut für Grüne Oxidationschemie der Carnegie-Mellon-Universität in Pittsburgh (Pennsylvania), das einer von uns (Collins) leitet. Sie tragen die Bezeichnung TAML – *tetra amide macrocyclic ligands* (makrozyklische Tetraamid-Liganden) – und können in Verbindung mit Wasserstoffperoxid und anderen Oxidationsmitteln eine breite Palette hartnäckiger Schadstoffe knacken. Dabei ahmen sie Enzyme nach, die Wirbeltiere im Verlauf der Evolution zum Abbau toxischer Verbindungen entwickelt haben.

Im Labor wie in realen Industrietests haben sich die TAML-Verbindungen als fähig erwiesen, Pestizide, Farbstoffe und andere schädliche Chemikalien zu vernichten, Geruch und Farbe des Abwassers aus Papiermühlen stark zu verringern und bakterielle Sporen abzutöten, die dem tödlichen Milzbranderreger ähneln. Diese »grünen« Moleküle können also entscheidend dazu beitragen, Umweltbelastungen durch die traditionelle Chemie zu reduzieren. Bei breiter Anwendung ließen sich zudem Millionenbeträge für die Abwasserreinigung einsparen.

Die chemische Industrie verschmutzt die Umwelt hauptsächlich deshalb, weil sie eine völlig andere Chemie betreibt als die Natur. Biochemische Prozesse haben sich über Jahrmillionen hinweg auf der Basis von Elementen entwickelt, die allgegenwärtig und leicht zugänglich waren – wie Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff, Schwefel, Kalzium und Eisen. Daraus entstand alles, vom Pantoffeltierchen bis zum Mammutbaum, vom Anemonenfisch bis zum Menschen.

Die Industrie dagegen holt sich auch noch die seltensten Elemente von überall her und verteilt sie dann auf eine Weise in der Umwelt, wie natürliche Prozesse das nie zu Stande brächten. Blei kam zum Beispiel früher nur in so isolierten, unzugänglichen Lagerstätten vor, dass die Natur nie darauf verfiel, es in Lebewesen aufzunehmen. Jetzt aber findet sich das Schwermetall überall – vor allem weil Anstrichfarben, Autos und Computer es verbreitet haben. Dadurch kann es in die Körper von Kindern gelangen, wo es bereits in geringsten Dosen schädlich wirkt. Dasselbe gilt für Kadmium, Quecksilber, Arsen, Uran und Plutonium.

Manche der neuen, synthetischen Moleküle in Arzneimitteln, Kunststoffen und Pestiziden unterscheiden sich so sehr von Produkten natürlicher chemischer Vorgänge, dass man meinen könnte, sie kämen aus einer anderen Welt. Vielfach sind sie nicht oder nur schwer biologisch abbaubar, und selbst unter denjenigen Verbindungen, die leicht von Bakterien vernichtet werden können, haben sich einige inzwischen überall angereichert, weil wir sie in derart riesigen Mengen einsetzen.

Deformierte Geschlechtsorgane

Manche dieser Stoffe stehen im Verdacht, die Entwicklung des Reproduktionssystems zu beeinträchtigen. So weiß man schon länger, dass männliche Nagetiere mit deformierten Geschlechtsorganen geboren werden, wenn ihre Mütter mit Phthalaten in Berührung kamen, die unter anderem als Weichmacher in Kunststoffen sowie als Trägersubstanzen für Duftstoffe in Kosmetika vorkommen. Im vergangenen Jahr berichtete Shanna H. Swan von der Universität Rochester (US-Bundesstaat New York) über ähnliche Missbildungen bei menschlichen Säuglingen. Eine weitere Studie unter ihrer Leitung ergab, dass der Urin von Männern mit niedriger Spermienzahl aus ländlichen Gegenden in Missouri ungewöhnlich große Mengen an Herbiziden wie Arachlor und Atrazin enthielt. Ausgehend von Fabriken und Feldern können sich biologisch nicht abbaubare Schadstoffe durch die Luft und mit dem Wasser ausbreiten und entweder direkt oder über die Nahrungskette in unseren Organismus gelangen.

Ziel der grünen Chemie ist es, das Übel an der Wurzel zu packen (siehe Kasten auf S. 92). Die Arbeit der Gruppe an der Carnegie-Mellon-Universität reicht bis in die 1980er Jahre zurück, als sich die Gesundheitsbedenken gegenüber Chlor mehrten. Das Gas diente damals wie heute im großen Stil zur Reinigung und Desinfektion – so auch zur Behandlung von Trinkwasser. Sein Einsatz ist zwar preiswert und effizient, erzeugt aber teils unliebsame Nebenprodukte. Aus der Zellstoffbleiche mit elementarem Chlor in Papierfabriken stammte bis vor Kurzem ein großer Teil der Krebs erregenden Dioxine. Deren Ausstoß ist zwar geringer geworden, seit die meisten Papiermühlen Zellstoff mit Chlordioxid bleichen, aber nicht gänzlich unterbunden. Auch bei der Chlorierung von Trinkwasser entstehen Nebenprodukte, die mit der Entste-

IN KÜRZE

▶ Viele schädliche Substanzen – darunter **Farbstoffe und Pestizide** – haben die Umwelt mittlerweile in einem Ausmaß großflächig verseucht, dass unsere Gesundheit bedroht ist.

▶ Chemikern gelang kürzlich die Entwicklung enzymähnlicher Katalysatoren, die sogar hartnäckige Schadstoffe zerstören können, indem sie deren **Reaktion mit Wasserstoffperoxid** beschleunigen.

▶ In Abwässern von Papierfabriken können diese »Metallkomplexe mit makrozyklischen Tetraamid-Liganden« die Verunreinigung durch färbende und **gefährliche Chemikalien** drastisch verringern.

▶ Das Potenzial der neuartigen Katalysatoren reicht jedoch viel weiter – von der **Trinkwasseraufbereitung** bis zur Dekontamination nach einem Angriff mit biologischen Waffen.

Verunreinigung der Gewässer

Die Schadstoffbelastung der Gewässer stammt aus vielen Quellen. TAML-Katalysatoren könnten einige der schlimmsten Verunreinigungen beseitigen, bevor diese in Flüsse und Seen gelangen. So ließen sich damit reaktive Farbstoffe, Organochlorverbindungen und andere gefährliche Chemikalien in Abwässern aus Textil- und Papierfabriken zerstören. TAML-Katalysatoren könnten aber auch dazu dienen, den Ablauf von Jauchegruben und Kläranlagen zu reinigen. Dieser enthält unter anderem Farbstoffe aus Buntwäsche und Medikamente, die mit dem Urin ausgeschieden werden.

hung gewisser Krebsarten in Zusammenhang gebracht wurden.

In der Natur kommt Chlor in harmlosen Chloridverbindungen wie Kochsalz vor. In elementarer Form ist es dagegen extrem aggressiv und reagiert bereitwillig mit anderen Molekülen. Dabei können Verbindungen entstehen, die störend in die Biochemie von Lebewesen eingreifen. Dioxine zum Beispiel beeinträchtigen die Zellentwicklung, indem sie ein Rezeptorsystem durcheinander bringen, das die Bildung wichtiger Proteine steuert.

Milliardenfache Beschleunigung

Deshalb fragten wir uns, ob man statt Chlor nicht die der Natur eigenen Reinigungsmittel – Wasserstoffperoxid und Sauerstoff – verwenden könne, um Wasser zu desinfizieren, Papier zu bleichen und Industrieabfälle zu zerstören. Mit diesen beiden Substanzen lassen sich viele Schadstoffe sicher und wirksam vernichten; allerdings benötigen die betreffenden Abbaureaktionen in der Natur normalerweise ein Enzym, um mit messbarer Geschwindigkeit abzulaufen. Ein solcher Katalysator agiert dabei wie eine altmodische Kupplerin.

Anstelle von zwei Menschen bringt er allerdings bestimmte Moleküle zusammen und sorgt dafür, dass es zwischen ihnen »funkt«. Einige natürliche Katalysatoren können chemische Reaktionen dadurch milliardenfach beschleunigen. Ein Beispiel ist das Enzym Pryalin: Hätten wir es nicht in unserem Speichel, bräuchte unser Körper mehrere Wochen, um Nudeln in ihre Zuckerbestandteile zu zerlegen. Ohne solche Reaktionsbeschleuniger wäre die Biochemie von lähmender Langsamkeit und Leben, wie wir es kennen, schlicht nicht möglich.

In der Natur katalysieren so genannte Peroxidasen Umsetzungen mit Wasserstoffperoxid, dem wohlbekannten Hausmittel zum Bleichen von Haaren und Entfernen von Flecken auf dem Teppich. Auf diese Weise zerlegen zum Beispiel Pilze auf vermodernden Waldbäumen das Lignin im Holz in kleinere Bestandteile, die sie dann verzehren können. Eine andere Enzymfamilie mit dem Sammelbegriff Cytochrom-p450 beschleunigt Reaktionen, bei denen Sauerstoff im Spiel ist – und sorgt so etwa für die Entgiftung eingeatmeter oder eingenommener Schadstoffe in der Leber.

Jahrzehntelang mühten sich Chemiker, kleine Moleküle herzustellen, die ▷

▷ ähnlich wirksam sind wie diese Enzyme – böten sie doch einen willkommenen Ersatz für herkömmliche Oxidationsverfahren auf Basis von Chlor oder Metallen, die viele Schadstoffe produzieren. Reagenzglas-Versionen von Enzymen zu fabrizieren wollte in den frühen 1980er Jahren jedoch niemandem glücken. In Jahrmilliarden der Evolution hat die Natur ein höchst elegantes und äußerst komplexes Räderwerk katalytischer Prozesse entworfen, gegen das sich unsere Anstrengungen im Labor klobig und unbeholfen ausnehmen. Gleichwohl können wir unser Ziel der Schadstoffverringerung nur erreichen, wenn wir diesen Tanz der Moleküle irgendwie nachahmen.

Eine molekulare Brandmauer

Eine grundlegende Schwierigkeit beim Entwurf künstlicher Abbauenzyme ist, dass sie robust genug sein müssen, um die zerstörerischen Reaktionen, die sie katalysieren sollen, selbst zu überstehen. Mit Sauerstoff zu arbeiten ist immer riskant; denn dieses Element verbindet sich begierig mit vielen anderen Atomen. Und weil das Wasserstoffperoxid-Molekül (H_2O_2) chemisch zwischen Wasser (H_2O) und molekularem Sauerstoff (O_2) angesiedelt ist, wirkt es ähnlich oxidierend. In Wasser löst es, wenn es aktiviert wird, eine Art kaltes Feuer aus, das die organischen, also kohlenstoffhaltigen Moleküle in der unmittelbaren Umgebung »verbrennt«.

Peroxidasen, die wir uns zum Vorbild nahmen, enthalten ein Eisenatom, das in der Mitte eines Quadrats aus vier Stickstoffatomen sitzt (siehe Kasten rechts). Diese sind mit ihm durch kovalente Bindungen verknüpft, das heißt, beide teilen sich je ein Elektronenpaar, das in diesem Fall vom Stickstoff stammt. Außerdem sind sie untereinander über organische Reste zu einem großen äußeren Ring verbunden, einem »Makrozyklus«. Bei einer solchen Struktur nennen Chemiker die kleineren Atome, die das Metall im Zentrum umgeben, samt den daran hängenden Gruppen Liganden.

Ein ähnliches Gebilde versuchten wir künstlich zu schaffen. Dabei mussten wir die Liganden in Aufbau und Verknüpfungsart so gestalten, dass sie wie eine Art Brandmauer dem von den TAML-Molekülen ausgelösten kalten Feuer widerstanden. Je länger ein Katalysator durchhielte, desto nützlicher wäre er. Andererseits sollte er aber auch nicht unzerstörbar sein; denn dann könnte er in die Gewässer gelangen und dort selbst zum Problem werden.

Die Liganden feuerfest zu machen war nicht ganz einfach. Es gelang uns schließlich mit einem vierstufigen Verfahren. Zunächst überlegten wir uns eine Konstruktion, die uns robust schien, und synthetisierten sie. Als Nächstes unterwarfen wir den damit ausgerüsteten Katalysator oxidierenden Bedingungen, bis die Brandmauer bröckelte. Als Drittes lokalisierten wir die Stelle, wo die Zerstörung begann. Sobald wir diese Achillesferse ausgemacht hatten, ersetzten wir sie durch Atomgruppen, die wir für widerstandsfähiger hielten, und begannen den Zyklus von vorn.

Nach fünfzehn Jahren Forschung hielten wir so um die Jahrtausendwende schließlich den ersten funktionsfähigen TAML-Katalysator in der Hand. Der Erfolg war uns klar, als Colin Horwitz, ein Forschungsprofessor an unserem Institut, eines Morgens der versammelten Mannschaft ein Experiment vorführte: Er spritzte dunklen Farbstoff in eine Lösung, die Wasserstoffperoxid und unser neuestes TAML-Modell enthielt, und wir konnten zusehen, wie die Farbe jedes Mal gleich wieder verschwand. Offenbar waren die Brandmauern nun so stabil, dass sich der Katalysator nicht selbst zerstörte, bevor er seine Aufgabe erledigt hatte. Das Molekül verhielt sich wie ein Enzym, war aber viel kleiner; sein Molekulargewicht betrug nur rund 500 Dalton – gegenüber zum Beispiel 40 000 Dalton bei der Meerrettich-Peroxidase, einem der kleinsten bekannten Enzyme.

Seit jenem denkwürdigen Morgen haben wir nach unserem vierstufigen Schema mehr als zwanzig verschiedene solche katalytisch aktiven Moleküle entwickelt. Wegen ihrer geringen Größe sind unsere TAML-Aktivatoren nicht nur leichter und billiger herzustellen, sondern auch vielseitiger anwendbar als ihre natürlichen Gegenstücke. Jedes hat seine eigene Reaktionsgeschwindigkeit und Lebensdauer, sodass wir je nach Aufgabe das passende Exemplar aussuchen können.

Die meisten unserer Katalysatoren enthalten Elemente wie Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff und Eisen, die nur eine geringe Toxizität haben. Einige nennen wir »Torpedo-TAMLs«, weil sie wie magnetische Minen, die vom Metallrumpf von Schiffen angezogen werden, gezielt bestimmte Schadstoffe aufspüren und daran andocken. Andere wirken eher wie Feuerwerfer – verbrennen sie doch so gut wie alle oxidierbaren Stoffe, mit denen sie in Berührung kommen. Wieder andere sind ziemlich wählerisch und greifen nur gewisse Molekülteile oder die leichter oxidierbaren Moleküle in einer Gruppe an.

Wir sehen noch viele Möglichkeiten, TAML-Katalysatoren an die unterschiedlichsten Bedürfnisse der grünen Chemie anzupassen. Zwar sind weitere Toxizitätstests nötig, aber die bisherigen Untersuchungen hatten ermutigende Ergebnisse. Demnach zerlegen unsere TAML-Katalysatoren Schadstoffe in nichttoxische Bestandteile und hinterlassen selbst keine nachweisbare Kontamination; denn alle zersetzen sich in Gegenwart von Sauerstoff oder Wasserstoffperoxid innerhalb von Minuten bis Stunden. Wir halten inzwischen über neunzig internationale Patente auf solche Moleküle, und weitere sind in Vorbereitung. Außerdem haben wir diverse kommerzielle Lizenzen.

Hungrig auf Elektronen

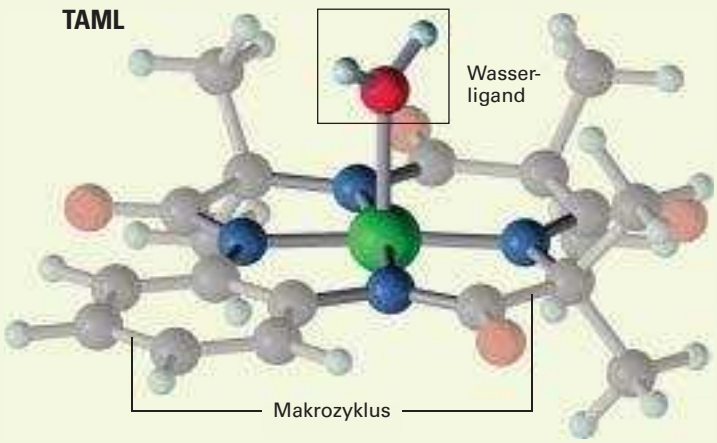
Paradoxerweise kennen wir die Wirkungsweise der TAML-Katalysatoren noch nicht in allen Details. Jüngste Untersuchungen haben jedoch Einblicke in die Schlüsselreaktionen geliefert. Im festen Zustand sitzt gewöhnlich ein Wassermolekül senkrecht zu den vier Stickstoffliganden als zusätzlicher Ligand am Eisen. In Lösung gesellt sich ein weiteres auf der gegenüberliegenden Seite hinzu. Diese Wassermoleküle sind nur sehr lose gebunden. So kann eines davon leicht durch Wasserstoffperoxid ersetzt werden, das sich gleichfalls in der Lösung befindet. Dieses stößt dann sehr schnell zwei Wasserstoffatome und ein Sauerstoffatom ab, die als Wassermolekül (H_2O) entweichen. Zurück bleibt ein Sauerstoff- am zentralen Eisenatom im Katalysator, der damit zum reaktiven Zwischenprodukt (RZ) wird.

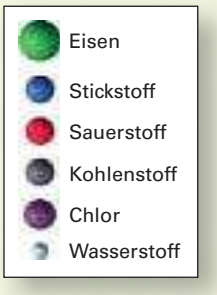
Ein einzelnes Sauerstoffatom als Ligand ist viel stärker elektronegativ als ein Wassermolekül und zieht deshalb die äußeren Elektronen vom Eisen-Atomkern zu sich herüber. Dessen positive Ladung nimmt folglich zu. Dadurch ist das RZ reaktiv genug, um oxidierbaren Molekülen in der Lösung Elektronen zu entreißen. Wir konnten noch nicht ermitteln, wie es dabei die Bindungen seiner Zielmoleküle aufbricht; die Antwort erhoffen wir uns von aktuellen Untersuchungen. Eines aber wissen wir: Die Zerstörungskraft un- ▷

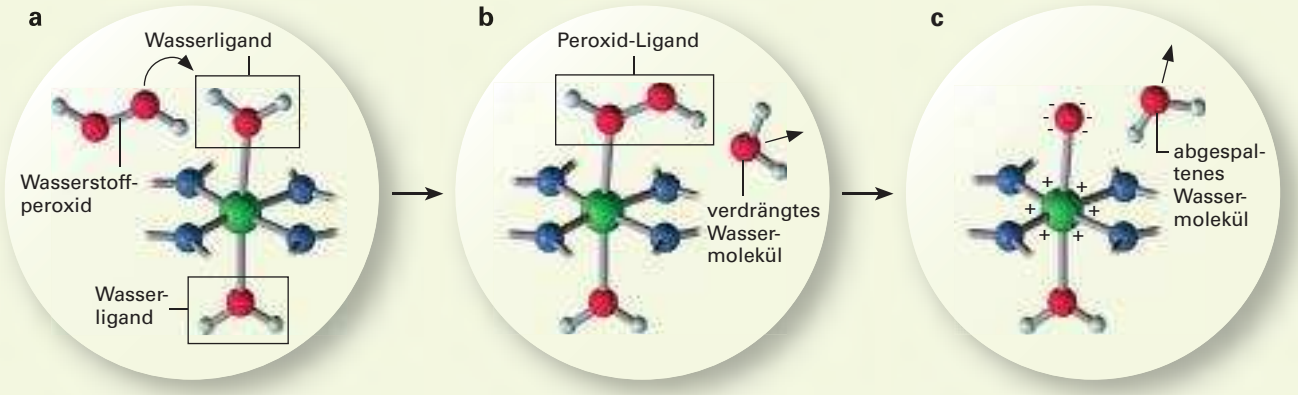
Eine molekulare Waschmaschine

Die TAML-Katalysatoren sind natürlichen Enzymen nachempfunden, welche biochemische Reaktionen unter Beteiligung von Wasserstoffperoxid katalysieren. Da sie aber nur knapp ein Hundertstel von deren Molekulargewicht haben, kann man sie sehr viel leichter und billiger herstellen.

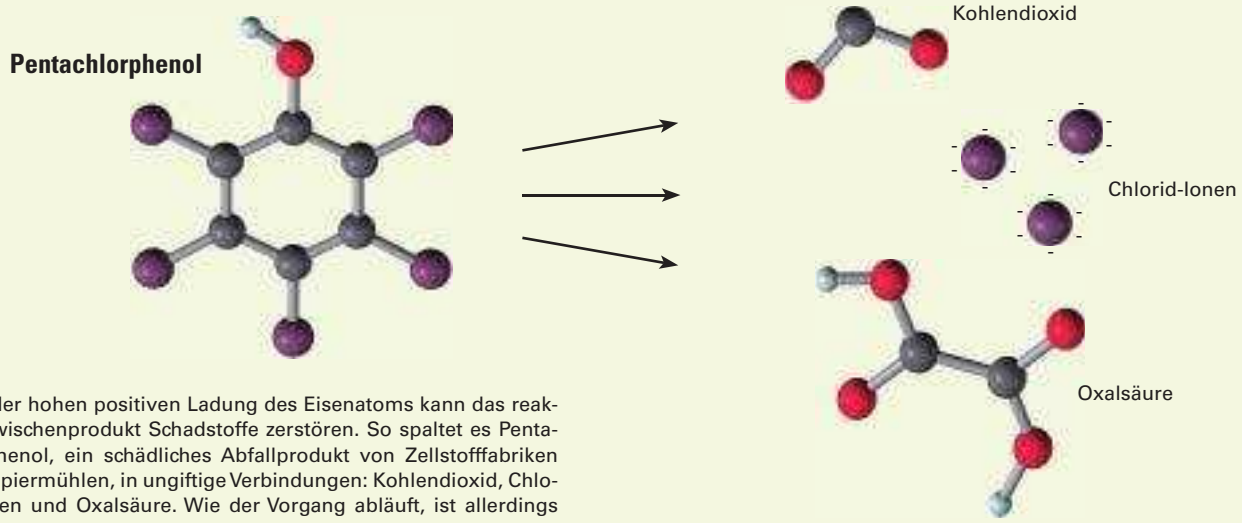
Im Zentrum jedes TAML-Katalysators sitzt ein Metallatom – in der Regel Eisen. Es ist an vier Stickstoffatome gebunden, die ihrerseits über ein Kohlenstoffgerüst zu einem großen Ring verknüpft sind. Dieser so genannte Makrozyklus wurde chemisch sehr robust gestaltet, sodass er wie eine Brandmauer wirkt, die das Molekül vor den von ihm selbst ausgelösten heftigen Reaktionen schützt. In festem Zustand hat das Eisen noch ein Wassermolekül (H_2O) angelagert. Chemiker bezeichnen die an das Metall gebundenen Gruppen als Liganden.







In wässriger Lösung heftet sich ein zweites Wassermolekül an das Eisenatom im Zentrum des TAML-Katalysators (a). Ist auch Wasserstoffperoxid (H_2O_2) zugegen, kann es einen der nur lose gebundenen Wasserliganden verdrängen (b). Anschließend spaltet das Peroxid selbst ein Wassermolekül ab, sodass von ihm nur ein Sauerstoffatom am Metall zurückbleibt (c). Dieses zieht Elektronendichte vom Eisenatom ab und verwandelt das TAML so in ein reaktives Zwischenprodukt.



Dank der hohen positiven Ladung des Eisenatoms kann das reaktive Zwischenprodukt Schadstoffe zerstören. So spaltet es Pentachlorphenol, ein schädliches Abfallprodukt von Zellstofffabriken und Papiermühlen, in ungiftige Verbindungen: Kohlendioxid, Chlorid-Ionen und Oxalsäure. Wie der Vorgang abläuft, ist allerdings noch nicht vollständig geklärt.

MELISSA THOMAS, NACH: ARANI CHANDA, INSTITUTE FOR GREEN OXIDATION CHEMISTRY, CARNEGIE MELLON UNIVERSITY

Die Chemie wird grün

Die TAML-Katalysatoren sind nur eine von mehreren Errungenschaften der »grünen« Chemie, die Produkte und Verfahren so gestalten will, dass weniger oder gar keine gefährlichen Substanzen eingesetzt oder erzeugt werden. Im Folgenden sind einige Beispiele aufgeführt.

Errungenschaft	Protagonisten	Stand
Synthese biologisch abbaubarer Poly-Milchsäuren aus Pflanzenzuckern als Ersatz für traditionelle Kunststoffe auf Petroleumbasis	Patrick Gruber, Randy L. Howard, Jeffrey J. Kolstad, Chris M. Ryan und Richard C. Bopp, NatureWorks LLC (eine Tochtergesellschaft von Cargill)	NatureWorks LLC hat in Nebraska eine Fabrik zur Produktion von Kügelchen aus Poly-Milchsäure gebaut, aus denen man Wasserflaschen, Verpackungsmaterial und andere Produkte herstellen kann.
Entdeckung von Synthese-Reaktionen, die statt in teils Krebs erregenden organischen Lösungsmitteln in gewöhnlichem Wasser ablaufen	Chao-Jun Li, McGill-Universität	Chemieunternehmen, die Arzneimittel und Gebrauchsgüter herstellen, prüfen die Eignung der Verfahren für den großtechnischen Einsatz.
Entwicklung der Metathese, einer organischen Synthesemethode, mit der sich Arzneimittel, Kunststoffe und andere Chemikalien schonender und mit höherer Ausbeute sowie mit weniger schädlichen Nebenprodukten herstellen lassen	Robert H. Grubbs, California Institute of Technology, Richard R. Schrock, Massachusetts Institute of Technology; Yves Chauvin, Institut Français du Pétrole	Das Verfahren findet breite Anwendung in der chemischen, biotechnologischen und Nahrungsmittelindustrie; die drei Protagonisten erhielten 2005 den Chemie-Nobelpreis.
Ersatz von Lösungsmitteln auf Petroleumbasis durch überkritisches Kohlendioxid, das bei hoher Temperatur und hohem Druck entsteht und die Eigenschaften einer Flüssigkeit und eines Gases in sich vereint	Martyn Poliakoff, Michael George and Steve Howdle, Universität Nottingham	Thomas Swan & Co., ein britischer Hersteller von Spezialchemikalien, hat eine Fabrik gebaut, in der überkritische Fluide zum Einsatz kommen.
Erfindung einer neuen Methode zur Herstellung des Antidepressivums Sertralin	James Spavins, Geraldine Taber, Juan Colberg und David Pfisterer, Pfizer	Das Verfahren senkt den Schadstoffausstoß sowie den Wasser- und Energieverbrauch; zugleich erhöht es die Arbeitssicherheit und die Produktausbeute.

▷ seres Katalysators lässt sich durch Austausch der Atome an seinem Vorder- und Hinterende erhöhen. Wenn wir hier stark elektronegative Elemente anbringen, ziehen diese weitere Ladungsdichte vom Eisen ab, was das RZ aggressiver macht.

Von Laborexperimenten zum großräumigen kommerziellen Einsatz ist es ein weiter Schritt. Doch konnten wir in etlichen Feldversuchen schon viel versprechende Resultate erzielen – etwa bei Tests zur Abwehr von bioterroristischen Angriffen. Wenn wir einen bestimmten TAML-Katalysator mit Tertiär-Butyl-Wasserstoffperoxid kombinieren – in dem ein Wasserstoff- durch ein Kohlenstoffatom mit drei Methylgruppen (CH_3) ersetzt ist –, tötet die resultierende Lösung binnen fünfzehn Minuten 99,99999 Prozent der Sporen von *Bacillus atrophaeus* ab, das dem Milzbranderreger stark ähnelt. Aber auch Alltagsanwendungen haben wir im Visier. So wollen wir ein billiges Desinfektionsmittel entwickeln, das infektiöse Mikroben in Wasser vernichtet – die Ursache vieler Todes- und Krankheitsfälle weltweit.

Klärung von Abwässern

In drei Feldversuchen haben wir außerdem erforscht, wie TAML-Katalysatoren die Umweltverschmutzung durch die Papier- und Zellstoffindustrie verringern können. Diese produziert jedes Jahr mehr als 100 Millionen Tonnen gebleichte Zellulosefasern, aus denen weißes Papier hergestellt wird. Beim traditionellen Bleichen bilden sich Dioxine, Chlorphenole und andere gefährliche Organochlorverbindungen. Viele Zellstofffabriken leiten außerdem kaffeebraunes Abwasser in Bäche, Flüsse oder Seen und färben sie dadurch dunkel. Das beeinträchtigt die Photosynthese der Wasserpflanzen, worunter auch alle Organismen leiden, die sich von ihnen ernähren.

Die Färbung stammt von großen Fragmenten des Polymers Lignin, das die Zellulosefasern im Holz zusammenhält. Es wird beim chemischen Aufschließen der Holzschnitzel und beim anschließenden Bleichen des Zellstoffs mit Chlordioxid entfernt und teilweise aufgespalten. Bakterien und andere Mikroorganismen in Klärteichen können nur die kleineren Fragmente abbauen; die größeren Bruchstücke gelangen in Flüsse und Seen.

In zwei Papiermühlen in den USA und einer in Neuseeland haben wir geprüft, wie gut eisenhaltiges Fe-TAML mit Lignin belastete Abwässer entfärbt. In Neuseeland behandelten wir eine Charge von 50000 Litern mit dem Katalysator und Peroxid. In den USA injizierten wir ihn dagegen mehrere Tage lang direkt in eine Zellstoffverarbeitungsanlage oder ein Abflussrohr. Insgesamt verringerte Fe-TAML die Färbung des Wassers um bis zu 78 Prozent und vernichtete 29 Prozent der Organochlorverbindungen.

Kein Verfärben von Wäsche mehr

Aber auch andere Anwendungen unserer Katalysatoren zeichnen sich ab. Eine hat Eric Geiger von der Firma Urethane Soy Systems in Volga (Süddakota) entdeckt. Demnach lassen sich mit Fe-TAML aus Sojabohnenöl nützliche Polymere herstellen, deren Eigenschaften mindestens so gut wie die von herkömmlichen Polyurethanprodukten sind. Ein weiteres Einsatzgebiet könnte Waschpulver sein: Setzt man ihm winzige Mengen TAML zu, erübrigt sich – so das Ergebnis unserer eigenen Versuche – die Trennung von Bunt- und Weißwäsche. Die Katalysatoren verhindern das Abfärben, indem sie den von einer bunten Faser abgelösten Farbstoff zersetzen, bevor er sich an weiße Textilien anheften kann. Schließlich arbeiten wir an einer neuen Familie von TAMLs, welche die äußerst festen Bindungen brechen kann, durch die manche Arzneimittel und Agrochemikalien stabil genug sind, um intakt bis ins Trinkwasser zu gelangen.

Trotz der beschriebenen Erfolge bedarf es weiterer Versuche im industriellen Maßstab – vor allem, um sicherzustellen, dass die TAML-Katalysatoren nicht neue, bisher unbemerkte Umweltprobleme schaffen. Zu oft schon schienen innovative chemische Technologien bei der Einführung völlig harmlos, und Jahrzehnte später kamen die verheerenden Folgewirkungen ans Licht. Wir wollen alles tun, was in unserer Macht steht, um derartige Überraschungen zu vermeiden.

Schließlich spielen auch die Kosten eine Rolle. Bei den meisten Anwendungen scheinen TAML-Katalysatoren konkurrenzfähig, aber in der Regel haben die Firmen viel Geld in die existierenden chemischen Verfahren gesteckt. Ein Wechsel zu neuen Systemen und Techniken ist gewöhnlich mit bedeutenden Investitionen verbunden. TAML-Katalysatoren haben jedoch den großen Vorteil, dass sie kein völliges Umrüsten erfordern. Außerdem bieten sie einen preisgünstigen Weg, den immer schärfer werdenden Umweltgesetzen in den USA, Europa und anderswo zu genügen, und dürften den Firmen damit letztlich sogar helfen, Geld zu sparen.

So erfreulich die bisherigen Erfolge der grünen Chemie sind, bilden sie allerdings nur kleine Schritte auf dem Weg zur Lösung der Umweltprobleme des 21. Jahrhunderts. Die grundlegende Frage lautet: Wollen wir auch in Zukunft bloß Notfall- oder aber Präventivmedizin betreiben? Die meisten Chemiker werden im Studium immer noch darauf getrimmt, elegante Lösungen und Verbindungen für ein gestelltes Problem zu finden, ohne die weiteren Auswirkungen zu bedenken. Die grüne Chemie will das ändern. De facto führen wir mit den überkommenen Produktionsweisen globale Experimente an unseren Ökosystemen und uns selbst durch – mit möglicherweise katastrophalen Folgen, wenn diese Versuche misslingen. Die industrielle Revolution hat die Menschheit einst planlos und blind in ein neues Zeitalter katapultiert. Vielleicht können wir heute unsere Kreativität einsetzen, um Fehlentwicklungen rückgängig zu machen und einen wohldurchdachten Kurs zu steuern, der die Welt und unsere Zukunft nicht gefährdet. ◁

Terrence J. Collins (oben) ist Chemieprofessor an der Carnegie-Mellon-Universität in Pittsburgh (Pennsylvania), wo er das Institut für Grüne Oxidationschemie leitet, und Honorarprofessor an der Universität Auckland (Neuseeland). **Chip Walter** ist Wissenschaftsjournalist und Buchautor von »Space Age« und »I am Working on That« (mit William Shatner). Er lehrt an der Carnegie-Mellon-Universität wissenschaftliches Schreiben und ist Vizechef der Presseabteilung am Medizinischen Zentrum der Universität Pittsburgh.

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

Rapid total destruction of chlorophenols by activated hydrogen peroxide. Von Sayam Sen Gupta et al. in: Science, Bd. 296, S. 326, 12. 4. 2004

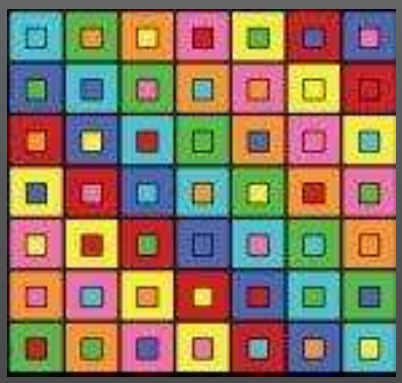
Toward sustainable chemistry. Von T. J. Collins in: Science, Bd. 291, S. 48, 5. 1. 2001

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

KNOBELEIEN

Unser original Rubik's-Cube im Spektrum-Design hat nicht nur sechs unterschiedliche Seiten – diese müssen auch noch in sich stimmig sein, da sie jeweils ein wissenschaftliches Motiv tragen. Der Cube besitzt eine Kantenlänge von 5,7 cm und kostet € 14,90 zzgl. Versand.
Zu beziehen über den Beihefter oder:

www.spektrum.de/lesershop



Wenn es Ihnen gelingt, jedem der Quadrate zwei Farben (innen & außen) zuzuweisen und dabei die äußerst strengen Regeln für Euler'sche Quadrate einzuhalten, dann heißt es »Gewonnen, Herr Euler«. Das Spiel finden Sie

kostenlos

unter www.spektrum.de/euler

REZENSIONEN

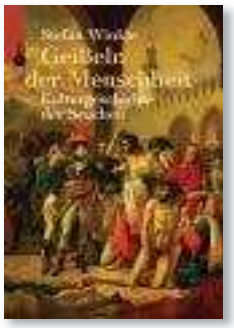
MEDIZINGESCHICHTE

Stefan Winkle

Geißeln der Menschheit

Kulturgeschichte der Seuchen

3. überarbeitete und ergänzte Auflage.
Artemis & Winkler, Düsseldorf 2005. 1534 Seiten, € 88,–



Wie keine andere Krankheit hat die Lepra über Jahrtausende soziales und ethisches Handeln bestimmt. Sie kam im frühen Mittelalter nach Europa und entwickelte sich im Lauf der Jahrhunderte zu einer Massenseuche. Allein in Frankreich zählte man im 12. Jahrhundert 2000 Leprosorien, in denen jeweils mehrere hundert Patienten untergebracht waren. Durch die für sie typischen Verunstaltungen und Verstümmelungen wurde sie zum Prototyp einer bösartigen Erkrankung, die allerdings – im Gegensatz zur Pest – das Individuum und nicht die Gesellschaft befiel.

Ohne eine klare Vorstellung darüber, wie die Krankheit zu Stande kam und sich ausbreitete, erklärte man von höchster Stelle Leprakranke zu »Aussätzigen«: Basierend auf dogmatischen Aussagen des Alten Testaments empfahl die katholische Kirche in ihren Konzilen von Orléans (549) und Lyon (589), die Leprösen vollständig und für immer aus der Gemeinschaft auszuschließen.

Der Patient wurde kraft Gesetzes seiner Güter beraubt und musste fortan vom Betteln leben. Da man die Lepra für vererbbar hielt, wurde auch die Intimsphäre des Betroffenen reglementiert. Nach einem Gesetz des Frankenkönigs Pippins des Großen galt die Erkrankung des Ehepartners als Scheidungsgrund. Wenig später verbot Karl der Große Leprakranken die Heirat ganz. Schottische Könige ordneten die Kastration leprakranker Männer an. Erkrankten Frauen wurde das Zusammensein mit Männern verboten unter der Androhung, sie lebendig zu begraben, falls sie schwanger würden und ein Kind zur Welt brächten.

Auf Grund der abstrusen Vorstellung, dass Lepra eine Folge von Unzucht mit einer menstruierenden Frau sei (die nach jüdischen Religionsvorstellungen als unrein galt), erteilte der Arzt Henri de Mondeville, der Ende des 13. Jahrhunderts in Montpellier lehrte, leprakranken Männern den perfiden Rat, die Folge eines solchen »unreinen Koitus« durch den Beischlaf mit einer Jungfrau zu beseitigen: »Dann wird diese von der Lepra angesteckt und er frei sein.« Wegen der ihr eigenen Bedrohlichkeit – einmal infiziert, sah sich der Patient mit seinem unaufhaltsamen körperlichen Verfall konfrontiert – eignete sich die Diagnose Lepra auch ideal zur Denunziation, um einen Nebenbuhler oder politischen Konkurrenten aus dem Wege zu räumen.

Zu Beginn der Neuzeit ging die Zahl der Leprösen stark zurück – man weiß bis heute nicht warum –, und die frei werdenden Plätze in den Leprosorien wurden durch allerlei Gesindel eingenommen. Johann Wilhelm, Herzog von Jülich und Berg, deckte 1708 eine ganze Serie von Verbrechen auf, die aus den Schlupfwinkeln der Leprosorien der jülisch-bergischen Lande heraus verübt worden waren.

»Lepra« ist nur das erste von 23 Kapiteln dieses auch äußerlich (mit zwei Kilogramm) gewichtigen Buchs. Die dritte, überarbeitete und erweiterte Auflage folgt in Themenauswahl und Darstellungsweise dem Original (siehe meine Besprechung der zweiten Auflage in Spektrum der Wissenschaft 3/1998, S. 106). Alle wirklich bedeutsamen Infektionskrankheiten werden in ihrem kulturellen und historischen Kontext dargestellt, darunter auch solche, die nur in Fachkreisen bekannt sind, wie die Krätze und die Psittakose (Papageienkrankheit). Plagen wie Lepra, Pest und Cholera, die die Mensch-

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Die Absonderung der Leprösen wurde inkonsequent praktiziert: In dem Gemälde »Der Streit des Karnevals mit dem Fasten« (1559) von Pieter Brueghel dem Älteren wandern sie in braunen Mänteln durch den Trubel.

heit über Jahrhunderte immer wieder in Angst und Schrecken versetzt haben, nehmen einen besonders breiten Raum ein.

Neben den Krankheiten der Alten Welt widmet sich der Autor klassischen Tropenseuchen wie Malaria, Schlafkrankheit und Gelbfieber. Hier erfährt der Leser, wie man in anderen Teilen der Welt mit Infektionskrankheiten umgegangen ist und wie Konzepte über Krankheitsentstehung auf anderen Kontinenten Geschichte geschrieben haben.

Ein kulturhistorisches Bonbon ist das neu hinzugekommene Kapitel über die Tanzwut. Das spontane Ausbrechen kollektiven, exzessiven Tanzens, das erstmals in den griechischen Mysterien Erwähnung findet und mit dem Beginn des 20. Jahrhunderts verschwindet, ist kein Ausdruck einer definierten Infektionskrankheit; je nach Epoche können Drogen oder psychische Ausnahmezustände die Ursache gewesen sein.

Völlig neu – und für einen Historiker ungewöhnlich aktuell – ist das Kapitel »Biologische Kriegsführung und Bioterror«, das sich mit dem gezielten Einsatz von B-Waffen vom Zweiten Weltkrieg bis zum September 2001 beschäftigt.

Seit Urzeiten begleiten Infektionskrankheiten den Menschen. Sie waren für die kurze Lebenserwartung unserer Vorfahren verantwortlich und haben bei Eltern und Kindern früherer Generationen unermessliches Leid verursacht. Als Massenepidemien von beispielsweise Pest und Cholera entvölkerten sie ganze Landstriche und warfen die wirtschaftliche Entwicklung häufig um Jahrhunderte zurück. Sie haben das Verhalten des Menschen beeinflusst und waren stets sogar fundamentale Faktoren von Moral und Ethik, indem sie den Umgang der Gesellschaft mit kranken Mitmenschen geprägt haben.

Diese Geschichten für die Nachwelt analysiert und verständlich gemacht zu haben, ist das Lebenswerk des gerade 94 Jahre alt gewordenen ehemaligen Professors für medizinische Mikrobiologie und Infektionsepidemiologie. Sein wahrhaft monumentales Opus findet auch in der englischen oder französischen Literatur nicht seinesgleichen. Allein die rund 3000 Fußnoten sind mit 322 Seiten ein Buch im Buch.

Die »Kulturgeschichte der Seuchen« ist ein absolutes Meisterwerk und wird auf lange Zeit das Maß aller Dinge bleiben.

Hermann Feldmeier

Der Rezensent ist Arzt für Mikrobiologie und Infektionsepidemiologie sowie Professor am Institut für Infektionsmedizin der Charité in Berlin.

MATHEMATIK

Keith Devlin

Der Mathe-Instinkt

Warum Sie ein Genie sind und Ihr Hund und Ihre Katze auch

Aus dem Englischen von Dietmar Zimmer.
Klett-Cotta, Stuttgart 2005. 248 Seiten, € 19,50

Dieses Buch behandelt zwei Themenbereiche, die an sich so gut wie nichts miteinander zu tun haben. Keith Devlin dagegen, Mathematikprofessor in Stanford (Kalifornien) und Autor zahlreicher populärer Werke über Mathematik, behauptet, sie seien im Wesentlichen dasselbe. Das durchzuhalten gelingt ihm nur mit einem sehr merkwürdigen Verständnis von mathematischer Tätigkeit. Liest man allerdings über diesen fundamentalen Fehler hinweg, findet man viele zum Teil sehr erstaunliche Tatsachen und Denkanstöße.

Das erste Thema, das etwas mehr als die Hälfte des Buchs ausmacht, lautet: Tiere lösen gewisse mathematische Probleme, zum Teil ausgesprochen schwierige. Ein Hund namens Elvis holt einen Ball aus dem Wasser, den sein Herr nicht senkrecht zur Uferlinie, sondern schräg hineingeworfen hat. Nun springt der Hund nicht in gerader Linie auf den Ball zu; er rennt ein Stück am Ufer entlang und geht dann ins Wasser, und zwar nicht etwa dort, wo er am Ufer dem Ball am nächsten ist, sondern ein wenig vorher. Auf diese Weise wählt der Hund nicht die kürzeste, sondern die schnellste Strecke aus, um den Ball aus dem Wasser zu holen. Nachmessen zeigt, dass der Hund ziemlich gut darin ist, diesen optimalen Weg abzuschätzen.

Aber folgt daraus, dass der Hund das Minimierungsproblem löst, das diese Aufgabe – mathematisch gesehen – ja ist? Dass er die Nullstelle der Ableitung einer quadratischen Funktion berechnet? Diese Schlussfolgerung geht mir eindeutig zu weit. An verschiedenen Stellen im Buch relativiert der Autor selbst diesen sehr drastischen Standpunkt. Es bleibt aber die Tatsache, dass der Hund recht genau schätzen kann, was der schnellste Weg ist. So wie wir schätzen können, wie wir einen Ball werfen müssen, um ein bestimmtes Ziel zu treffen. Mit einiger Übung, versteht sich. Und nicht, indem wir eine komplizierte mathematische Aufgabe berechnen! Schade, dass Devlin dieses Beispiel in seinem Buch nicht bringt.

Pflanzen verhalten sich in ihrem Wachstum nach gewissen Regeln, die man mathematisch beschreiben kann. Ebenso Schneckenhäuser, und es gibt noch viel mehr Beispiele. Aber berechnet eine Sonnenblume Fibonacci-Zahlen, wenn ihre Kerne wachsen? Oder berechnet eine Schnecke Logarithmen? Wohl kaum. Viele Sachverhalte in der Natur lassen sich durch mathematische Gleichungen beschreiben, und es ist sehr berechtigt, die faszinierenden Lösungen, welche die Evolution gefunden hat, zu bewundern. Damit kann aber nicht gesagt werden, dass die Natur Mathematik betreibt.

Wie kommt Devlin eigentlich zu diesem Fehlschluss? In einem kleinen Satz passiert es: Wir treiben Mathematik, indem wir bewusst über bestimmte Dinge nachdenken. Nehmen wir einen Taschenrechner oder einen Computer zu Hilfe, so treiben wir immer noch Mathematik. Achtung, jetzt kommt's: »In vielen Fällen können wir uns sogar mit der Behauptung abfinden, der Taschenrechner oder Computer betreibe die Mathematik.« Der Rest des falschen Schlusses geht ganz schnell: Was wir einer Maschine zubilligen, das werden wir doch wohl auch einem lebenden Wesen wie unserer Hauskatze zugestehen?

Nur: Was ist mit einem kosmischen Gesteinsbrocken? Der findet auch seinen Weg durchs All, den das Gravitationsgesetz ihm vorschreibt. Aber kein Mensch würde dem Stück Stein die Fähigkeit zuschreiben, die zugehörigen Differenzialgleichungen zu lösen.

Aber was Devlin uns aus der Tier- und Pflanzenwelt berichtet, wird durch das falsche Etikett um keinen Deut weni- ▷

▷ ger interessant. Die Orientierungsleistungen der Ameisen, Bienen, Langusten oder auch Zugvögel und Schmetterlinge sind mehr als erstaunlich. Fellmusterungen von Raubkatzen, die erwähnten Fibonacci-Zahlen, wie man sie an etlichen Pflanzensorten finden kann, und viele andere Dinge werden schön beschrieben und erklärt. Manche Erkenntnisse in diesen Bereichen sind erst wenige Jahre alt; hier ist das Buch durchaus aktuell, auch wenn viele der Beispiele schon lange in der einschlägigen Literatur zu finden sind.

Im zweiten Teil geht es dann darum, wie ein Mensch rechnet. Hier hat Devlin uns einige handfeste Überaschungen zu bieten. Es beginnt mit Forschungsergebnissen über die angeborenen oder in den ersten Lebenswochen erworbenen Zahlenfähigkeiten, einschließlich der zugehörigen Forschungsmethode. Schließlich kann man ein wenige Wochen altes Baby nicht fragen, ob es zwischen 1 und 2 und viele einen Unterschied macht. Jedenfalls wissen diese Kleinen schon, dass 1+1=2 ist und nicht viele, und dass noch 1 übrig bleibt, wenn man von 2 wieder 1 wegnimmt.

Weiter geht es mit dem, was der Autor Straßenmathematik nennt. Die Kinder, die auf den Straßenmärkten in Südamerika Waren verkaufen, können auch ohne oder fast ohne Schulbildung sehr wohl ausrechnen, was ein Kunde zu zahlen hat und wie viel Geld er zurückbekommt. Allerdings rechnen diese Kinder ganz anders, als man es in der Schule lernt! Stellt man ihnen genau dieselben Aufgaben wie auf dem Markt in Form einer Mathematikarbeit, so versagen sie völlig, weil sie ihre Straßenmathematik nicht auf die Schulaufgaben übertragen können und damit auf die Rechenregeln angewiesen sind, die sie (vielleicht) in der Schule gelernt, aber nicht verstanden haben.

Angeregt durch diese Beobachtungen, hat man ähnliche Experimente auch in den USA gemacht, indem man Leute beim Einkaufen im Supermarkt beobachtete. Hier besteht ein häufiges Problem darin, Preise bei unterschiedlichen Packungsgrößen zu vergleichen. Stehen verschiedene Füllmengen zu verschiedenen Preisen zur Auswahl, muss man einen Dreisatz anwenden. Hier ist es wieder ganz ähnlich: Die Leute konnten mit großer Sicherheit die günstigeren Produkte auswählen, aber dasselbe Problem als Rechenaufgabe kaum lösen.

Leider sagt Devlin nichts darüber, wie man diese Erkenntnisse in den Schulunterricht einbauen müsste, damit die Leute vielleicht einen besseren Zugang zur Mathematik bekommen könnten oder die in der Schule gelernten Regeln auch im Alltag anwendbar würden. Insofern bleibt die ganze Geschichte ein bisschen offen, Platz genug zum Nachdenken also.

Tobias Scheuer

Der Rezensent ist promovierter Mathematiker und Development Architect bei SAP in Walldorf.

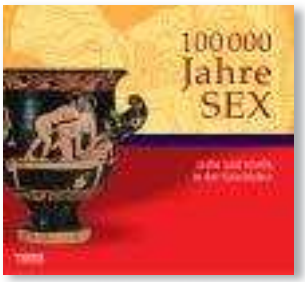
ARCHÄOLOGIE

Vincent T. van Vilsteren und Rainer-Maria Weiss (Hg.)

100 000 Jahre Sex

Liebe und Erotik in der Geschichte

Aus dem Niederländischen, Englischen und Französischen von Martin Devens. Theiss, Stuttgart 2005. 108 Seiten, € 22,–



Seit 2003 erreicht die Wanderausstellung »100 000 Jahre Sex« überall in Mitteleuropa Rekordbesucherzahlen. In dem gleichnamigen Begleitbuch haben die beiden namhaften Herausgeber und 29 weitere Autoren – Archäologen, Historiker und Soziologen – die Fülle der Exponate aus acht Ländern und 60 Museen in sechs Kapiteln überschaubar geordnet. Liebe und Erotik, Lust und Verführung, Ehe und Prostitution, Begierde und Gewalt, Sünde und Prüderie, Homosexualität und Sodomie, von Skandinavien bis Griechenland, alles findet seinen Platz.

Der dennoch schmale Band hebt sich angenehm von vergleichbaren, schweren Katalogen ab. Die warmen, erdig gelben und roten Töne des Covers setzen sich vielfach auf den Innenseiten fort, harmonieren oder kontrastieren mit weißen, grauen oder grünen, verstärken bewusst die Wirkung der gut positionierten Abbildungen. Der lebhaften Farbigkeit entspricht die lockere Textgestaltung. Treffend formulierte Überschriften verleiten zu spontanem Lesen. Sprachlich erfrischend unkonventionell werden auch jene Bilder erörtert, die einige Betrachter peinlich berühren könnten. Die Lektüre ermüdet nicht, obgleich die wissenschaftliche Grundhaltung der Autoren stets spürbar bleibt.

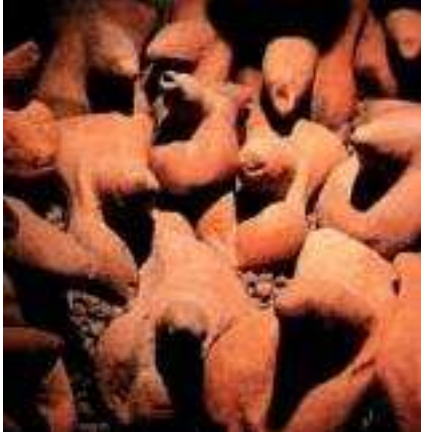
Sex schon seit 100 000 Jahren? Welche Frage! Allerdings gibt es erst seit 35 000 Jahren Darstellungen, die für das ungeübte Auge auch noch entziffert werden müssen: plastische, üppige Urmütter oder Fruchtbarkeitsidole, Jahrtausende später gefolgt von stilisierten Frauenfiguren und Details weiblicher Genitalien, in Stein geritzt oder gemalt. Auch Paare beim Koitus sind zu beobachten. Aus der Altsteinzeit sind weit mehr weibliche als männliche Darstellungen überliefert.

Dass jede Kunstform der Frühzeit auch Ausdruck einer an Religion und Kult orientierten Geisteshaltung ist, bestätigen männliche Holz- und Bronzefiguren aus Nordeuropa, zwischen 1400 v. Chr. und 1200 n. Chr. Die sehr reduzierten, ästhetisch wenig ansprechenden Körper dokumentieren Potenz, Phallusverehrung und möglicherweise Gewalt, verbunden mit Sex und Tod bei rituellen Handlungen der Wikinger, wie sie Augenzeugen der Bootsbestattungen eindrücklich schildern. Passagen aus den nordischen Epen erhellen zusätzlich bäuerliches Sexualverhalten.

Die Zeugnisse der griechischen, besonders aber der römischen Antike mit ihrer freizügigen Auffassung von Lebensgenuss und Sex nehmen einen breiten Raum ein. Verströmen die Wandmalereien römischer Häuser und Villen eine animierend-erotische Atmosphäre, sprechen die Graffiti der Bordelle und Thermen eine deftigere Sprache. Der Fruchtbarkeitsgott Priapus genoss große Verehrung. Sie erklärt die häufige Wiedergabe des auffällig überdimensionierten, öffentlich sichtbaren männlichen Glieds, vornehmlich in der Kleinkunst (Bild S. 106). Grundsätzlich assoziierte man mit dem Phallus Fruchtbarkeit, Männlichkeit, Streben nach Macht, Dominanz auf politischer und privater Ebene. Als Amulett getragen wehrte er Übel ab, bot Schutz gegen den Bösen Blick, eine Vorstellung, die noch auf flämischen Wandtellern des 15. Jahrhunderts zu finden ist.

Mit der Ausbreitung des Christentums veränderten sich die Sitten und die

Mit großer Regelmäßigkeit pflegten die Römer Phalli aus Terrakotta in der Hoffnung auf Genesung, Fruchtbarkeit und Potenz zu opfern (links). Eine Mechanik in der Schweizer Taschenuhr von 1820 versetzte das Pärchen zu bestimmten Zeiten in Auf-und-Abbewegung.



Kunstformen. In mittelalterlichen Schriften, archäologischen Funden und Bildern, die von den Autoren erfreulich souverän interpretiert werden, zeigt sich die tiefe Kluft zwischen strenger Kirchenlehre und natürlichem sexuellem Bedürfnis. Es scheint, dass Sex das wichtigste Beichtthema war, deshalb wurde das Strafmaß für unerlaubte Handlungen in Bußbüchern fixiert. Die rigiden Richtlinien zu Fasten, Enthaltsamkeit und Bändigung der Lust galten gleichermaßen für bürgerliche Eheleute, Prostituierte und das muntere Treiben in Klöstern. Pikanterweise stammt die Schilderung vieler sexueller Praktiken um 1000 aus der Feder des Bischofs Burchard von Worms, ebenso wie die erste Erwähnung eines Dildos. Diese Geräte wurden gerne in Bordellen und Nonnenklöstern benutzt; archäologische Funde bestätigen es. Als Antwort auf den von der Kirche gesetzten Moralkodex setzt bald eine Flut satirischer, antiklerikaler und pornografischer Darstellungen ein. Die niederländische Malerschule im Goldenen Zeitalter hält pralles Alltagsleben fassettenreich fest.

Erfreulicherweise werden auch die Nöte der Frauen erörtert, für die Liebe und Sex bis in die jüngste Vergangenheit mit Furcht vor ungewollter Schwangerschaft und Ansteckung mit Geschlechtskrankheiten verknüpft waren. Das begrenzte medizinische Wissen antiker Ärzte wurde durch seltsame magische Praktiken und durch Weihgeschenke an die zuständigen Gottheiten unterstützt. Erst die Erfindung von Kondomen – zunächst aus Tierdärmen, später aus Leinen, das mit Flüssigkeit getränkt und dann getrocknet wurde – brachte etwas Entspannung. Die ältesten Kondomfragmente wurden in der englischen Burg Dudley Castle gefunden. Der Überlieferung nach war ihr Erfinder Oberst Condom, der Leibarzt Charles II. (1630–1685), der auf diesem Wege die Vielzahl königlicher Nachkommen und damit Thronansprüche einzugrenzen versuchte.

Frühe, unbenutzte Kondome aus Tierdärmen, skurrile Amulette und Abzeichen stehen beispielhaft für die Fülle »anstößiger Erotika«, die das Britische Museum in seinem Secretum hütet. Bereits 1830 gegründet, erhielt es seinen offiziellen Status 1865, als der Arzt und ▷

»STERNE UND WELTRAUM« FÜR SCHULEN

Die Wilhelm und Else Heraeus-Stiftung übernimmt erstmalig im Rahmen der Aktion »Wissenschaft in die Schulen!« für 100 Schulen die Kosten eines Online-Zugangs zum Archiv von »Sterne und Weltraum« für ein Jahr!

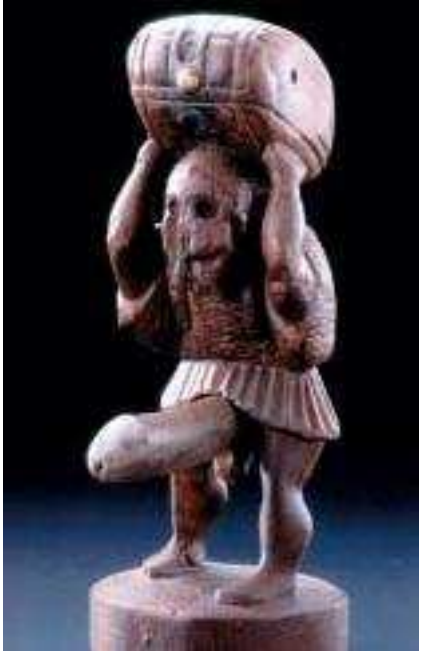
Wenn Sie Lehrer sind und mit Ihrer Schule teilnehmen möchten, wenden Sie sich bitte innerhalb von sechs Wochen nach Erscheinen dieser Anzeige an:
Wissenschaft in die Schulen!
Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH,
Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Deutschland
E-Mail: wis@wissenschaft-schulen.de
Voraussetzung für eine Teilnahme ist die Begründung der Bewerbung (max. eine Seite Text), die Angabe von Namen und Anschrift der Schule sowie Ansprechpartner inklusive E-Mail-Adresse.

»Wissenschaft in die Schulen!« bietet monatlich praxisnahes didaktisches Material zu ausgewählten naturwissenschaftlichen Themen und kann in den regulären Unterricht einbezogen werden. Für das Gebiet Physik ist dies dank einer Kooperation des Max-Planck-Instituts für Astronomie in Heidelberg, der Landesakademie für Fortbildung und Personalentwicklung an Schulen, Donaueschingen, und der Klaus-Tschira-Stiftung gGmbH möglich. Das Material befindet sich bei www.wissenschaft-schulen.de.
Die Wilhelm und Else Heraeus-Stiftung ist eine gemeinnützige Stiftung des bürgerlichen Rechts. Ihr Zweck ist die Förderung von Forschung und Ausbildung in den Naturwissenschaften, insbesondere der Physik. Die Stiftung arbeitet eng mit der Deutschen Physikalischen Gesellschaft zusammen.

Eine Initiative von Spektrum der Wissenschaft
mit den Schirmherren Max-Planck-Institut für Astronomie und Gesellschaft für Biochemie und Molekularbiologie e. V.

Naturwissenschaftliches Wissen aus erster Hand für Schulen und Schüler

wis
wissenschaft in die schulen!



Der Phallus dieses Mannes aus Holz, der am römischen Limes gefunden wurde, diente als Kerzenhalter, wie die Brandspuren im Gesicht belegen.

▷ Bankier George Witt seine bedeutende Sammlung zeit- und kulturübergreifender phallischer Artefakte dem Museum übereignete. Dieses machte sie jedoch nur wenigen Gebildeten mit »geistiger Widerstandskraft« zugänglich, da man allein durchs Betrachten einen Kollaps der sittlichen Ordnung im viktorianischen England befürchtete!

Die Autoren haben die Möglichkeiten der Quellenforschung gewissenhaft ausgeschöpft. Ihnen gelang ein kühner Brückenschlag von der dunklen Vorzeit bis ins 19. Jahrhundert. Minimale Übersetzungsunebenheiten sind entschuldbar. Der nur flüchtig Interessierte findet eine fantasieanregende Lektüre mit Schauefekten. Fachwissenschaftlich orientierte Leser profitieren von den fundiert bearbeiteten Texten und Bildern, die das eigene Wissen vertiefen und den Blick schärfen für Symbole, zum Beispiel auf holländischen Genreszenen und Tabakdosen. Wünschenswert wären eine Zeittafel im Anhang und ein verständlicheres Abbildungsverzeichnis, das der Seitenfolge entspricht.

»100 000 Jahre Sex« wird dem Thema in all seinen Spielarten gerecht. Als Musterexemplar am Bücherstand ausgelegt, wird dieser Band bald zu den abgegriffensten zählen.

Es gibt zu diesem Thema »nichts Neues unter der Sonne«, sagt van Vilsteren in der Einführung. Aber für manchen Zeitgenossen dürfte einiges Alte durchaus neu sein.

Eva Grabow

Die Rezensentin ist promovierte Archäologin, freie Mitarbeiterin am Archäologischen Museum der Universität Münster und Volkshochschuldozentin mit vielseitiger Vortragstätigkeit.

WISSENSCHAFTSGESCHICHTE

Len Fisher

Der Versuch, die Seele zu wiegen

und andere Sternstunden von Forschern und Fantasten

Aus dem Englischen von Carl Freytag.
Campus, Frankfurt am Main 2005. 263 Seiten, € 24,90

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts versuchte der amerikanische Arzt Duncan McDougall, auf experimentellem Weg das Gewicht der Seele zu bestimmen, und kam zu einem konkreten Ergebnis: 21 Gramm.

Der Aufbau des Experiments war im Prinzip nicht zu beanstanden. McDougall legte Sterbende samt Sterbebett auf eine Präzisionswaage, bestimmte das Gewicht vor und nach Eintritt des Todes und diskutierte ausführlich die möglichen Störfaktoren.

Es ist nicht nur die Methode, die Wissenschaftliches von Unwissenschaftlichem trennt. Motivationen, Arbeitsweisen, aber auch die Umwelt beeinflussen die Arbeit eines Forschers bis hin zur Wahl seiner Themen. Die Geschichte der Wissenschaft gleicht mitnichten einer geraden Straße, vielmehr einem verschlungenen Waldpfad mit vielen Windungen, Stolpersteinen, Möglichkeiten, im Kreis zu laufen, und vor allem Sackgassen. Echten Sackgassen oder solchen, die sich im Nachhinein doch als gangbar herausstellten, weil als gesichert geltende Vorstellungen widerlegt wurden oder weil ein Wissenschaftler sich herausgefordert fühlte, dort weiterzubohren, wo der Kollege es als aussichtslos aufgegeben hatte. Obendrein spielen Kuriositäten und Zufälle eine nicht zu unterschätzende Rolle.

Diese Thematik zieht sich wie ein roter Faden durch die verschiedenen Kapitel des Buchs. Len Fisher studierte Physik, Chemie und Biologie; derzeit forscht er an der Universität Bristol und verfasst Kolumnen für den »Guardian«. Bereits im Jahr 2003 bewies er mit seinem Bestseller »Reise zum Mittelpunkt des Frühstückseis« (Spektrum der Wissenschaft 6/2003, S. 102), dass ihm die verständliche und unterhaltsame Darstellung der Naturwissenschaften am Herzen liegt.

Dem Stil dieses Werks ist Fisher treu geblieben: Er vermittelt schwierige Themen mit Hilfe lebhafter Sprache in Form von kleinen Geschichten. Die acht Kapitel sind voneinander unabhängig, nicht streng chronologisch geordnet und ohne Anspruch auf vollständige Beschreibung eines wissenschaftlichen Gebiets.

Indem Fisher zum Beispiel die Leistungen Galileis und Newtons in enger Verflechtung mit deren Biografien beschreibt, bringt er die Koryphäen dem Leser als Menschen nahe – und die spannende Geschichte lässt ihn mitfiebern. Auch Forscher wie Luigi Galvani (1737–1798), der durch Elektrizität die Schenkel toter Frösche zum Zucken brachte, und sein Zeitgenosse Alessandro Volta (1745–1827), der im öffentlichen Bewusstsein nur als Namensgeber für die Einheit der elektrischen Spannung fortlebt, finden Erwähnung. Nicht zuletzt würdigt Fisher das Verdienst der Alchemisten als Wegbereiter der modernen Chemie und Physik. Ein Kapitel über die wichtigsten Postulate und Theorien der modernen Physik komplettiert das Werk.

Das ganze Buch ist durchsetzt mit Anekdoten aus dem Leben des Autors und einem gehörigen Maß an Humor. Ganz beiläufig erklärt Fisher dabei, wie die ersten Batterien funktionierten, weshalb Klone eigentlich nichts Neues sind oder wie sich die Wellenstruktur des Lichtes mit den eigenen Fingern erkennen lässt: Man presse Zeige- und Mittelfinger fest zusammen, halte sie gegen starkes Licht und öffne sie gerade so weit, dass ein schmaler Spalt entsteht. Dann sieht man in dieser Lücke eine Reihe dunkler Linien in der Luft schweben. Der Effekt ist dadurch zu erklären, dass die von den Rändern der Finger abgelenkten Lichtwellen miteinander interferieren.

Bei all der scheinbaren Leichtigkeit sind die Themen gut recherchiert und in

einem über fünfzig Seiten fassenden Anhang dokumentiert. Dieser enthält neben Quellen auch zahlreiche Anekdoten oder Tipps zur weiterführenden Lektüre.

Aber er ist handwerklich schlecht gemacht. Eine Fußnote im Text lässt nicht erkennen, ob sie lediglich auf einen Literaturnachweis verweist oder auf wichtige Erläuterungen von mehr als einer Seite oder gar auf eine skurrile kleine Geschichte, die direkt an die betreffende Textzeile anknüpft. Also bleibt dem Leser nur die Wahl, andauernd zu blättern oder aber auf einige Schätze zu verzichten. Zu allem Überfluss sind die Fußnoten nicht fortlaufend nummeriert; vielmehr beginnt die Zählung bei jedem Kapitel neu, und in dem langen Anhang weiß man nie, zu welchem Kapitel die aktuellen Fußnoten gerade gehören. Wer nicht dauernd einen Finger im Anhang lässt, blättert sich müde.

Umso gelungener ist am Ende des Buchs das Register der wichtigsten Themen, Termini und Forscher mit entsprechenden Seitenzahlen.

Len Fisher schafft auch in seinem neuen Werk den richtigen Mittelweg zwischen Unterhaltung und Information sowie einfacher Sprache und notwendiger Komplexität. Der Laie erhält auf unterhaltsame Weise Einblicke in die Grundlagen der Naturwissenschaften. Dem fachlich Versierten werden sich ganz neue Hintergründe erschließen.

Stefan Keilmann

Der Rezensent hat Germanistik und Philosophie studiert und ist freier Journalist in Ludwigshafen.

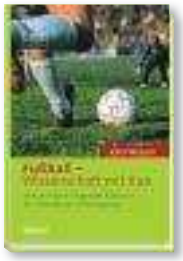
PHYSIK

John Wesson

Fußball – Wissenschaft mit Kick

Von der Physik fliegender Bälle und der Statistik des Spielausgangs

Aus dem Englischen von Michael Zillgitt und Carsten Heinisch. Elsevier Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2006. 232 Seiten, € 15,–



Die Bewegungsgesetze Isaac Newtons (1643–1727) gelten, wie für jede bewegte Masse, auch für den Fußball; aber ob und wie der große Meister selbst das runde Leder getreten hat, ist nicht überliefert. Umgekehrt rechnet kein Spieler Newtons zweites Bewegungsgesetz nach, bevor er schießt. Er hat gar keine Zeit dazu; er muss sogar viele Bewegungsabläufe unbewusst antizipieren, um am Ball zu bleiben. Trotz aller Wissenschaft bleibt Fußball also ein Spiel. Vielleicht hält es der Ball wie die sprichwörtliche Hummel, die nur deswegen fliegen kann, weil sie die Gesetze der Physik nicht versteht, die ihr angeblich das Fliegen verbieten.

John Wesson, ehemals theoretischer Physiker und aktiver Fußballer, verfügt nun im Ruhestand über die Muße, die beiden wenig kompatiblen Kulturen zu vereinen. Im Originaltitel »The Science of Soccer« erhebt er noch den wissenschaftlichen Anspruch; aber im Inneren hat er sein Buch weit gehend allgemein verständlich gehalten. In neun Kapiteln beschreibt er formelfrei physikalische Abläufe, unterstützt durch zahlreiche Grafiken und realistische Zahlenbeispiele. Vom simplen Aufprallen des Balls über die Ballannahme und den klugen Pass kommt er zum Höhepunkt jeglicher Ballphysik, der Bananenflanke. Mit Letzterer hat sich auch schon Isaac Newton beschäftigt, wenn auch im Zusammenhang mit Tennis. Im zehnten und letzten Kapitel liefert der Autor zu allen Themen den Formelapparat nach – verständlich mit Vorkenntnissen der gymnasialen Oberstufe und eine Fundgrube für Physiklehrer auf der Suche nach motivierenden Anwendungen der Wissenschaft.

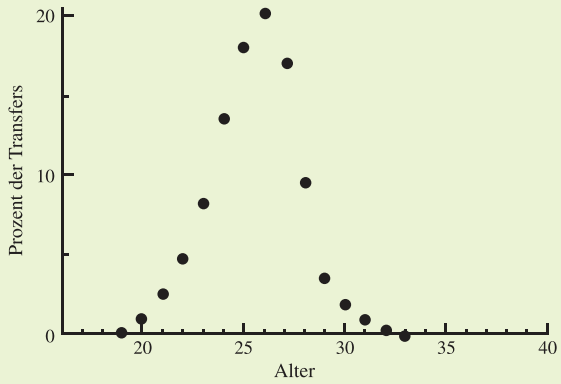
Doch den Physiker Wesson beschäftigt weit mehr als nur die Bewegung der Lederkugel, er behandelt auch Fragen, die das Spiel insgesamt betreffen. Besonders schön sind seine Untersuchungen zu der Frage, ob wirklich immer die beste Mannschaft am Saisonende den Meister stellt. Dass dem nicht so sein muss, trägt zum Reiz des Spiels bei. Anders als beim Handball oder gar beim Basketball, wo die vielen Treffer in einem Spiel der besseren Mannschaft die Gelegenheit geben, sich auch wirklich durchzusetzen, kann beim Fußball auch der Schwächere gewinnen, denn ein einzelnes Tor hat eine viel größere Bedeutung. Wie sich dies auf den Verlauf einer ganzen Saison auswirkt, erläutert Wesson mit stochastischen Mitteln und konkreten Beispielen. Auch hierzu finden sich im zehnten Kapitel die verwendeten Formeln.

Die Wahrscheinlichkeitstheorie benutzt der Autor auch, um die Stärke einzelner Spieler zu bewerten. Dass dabei Gerd Müller um den Faktor vier besser abschneidet als Jürgen Klinsmann, überrascht den Fußballkenner nicht.

Spätestens in diesem Kapitel gerät der Autor an die Grenzen der Schulmathematik. Die elementare Ballphysik lässt sich noch geschlossen beschreiben, aber komplexere Aspekte dieses Spiels sind nicht einfach auf die Newton'schen Gesetze und die Regeln der Kombinatorik zu reduzieren. Hier hält Wesson den Ball flach, und der deutsche Verlag hat gut daran getan, den wuchtigen Titel der Originalausgabe nicht einfach zu übernehmen. Das Buch bietet keine Wissenschaft vom Fußball, sondern eine solide, durchaus spielerische Abhandlung über das Spiel für mathematisch-physikalisch interessierte Leser. So bleibt das Buch auch handlich und passt in jede Sporttasche.

Stefan Taube

Der Rezensent studierte Mathematik und Physik für das Lehramt, ist gelernter Buchhändler und aktiver Fußballer in der inoffiziellen Werksmannschaft von Spektrum der Wissenschaft.



Die 25-jährigen Fußballspieler sind die teuersten: Altersverteilung der Spieler bei den Transfers in der britischen Premier League mit Transfersummen über 1 Million Pfund.

Topologie und Kombinatorik des Fußballs

Der Ball ist rund; aber für einen Topologen ist diese Aussage erst der Anfang einer Exkursion durch eine Welt deformierbarer Muster.

Von Dieter Kotschick

Was ist ein Fußball? Die offizielle Definition der Fifa sagt nur geringfügig mehr als der klassische Spruch »Der Ball ist rund«: Er soll eine Kugel mit einem Umfang zwischen 68 und 70 Zentimeter sein, und wenn er mit 0,8 Atmosphären Überdruck aufgeblasen ist, sind höchstens 1,5 Prozent Abweichung von der Kugelgestalt erlaubt.

Aber welches Bild kommt Ihnen in den Sinn, wenn Sie an Fußball denken? Mit größter Wahrscheinlichkeit ist es jenes schwarz-weiße Muster, das Ihnen zurzeit aus Anlass der Weltmeisterschaft von jeder Werbefläche entgegenstrahlt (Bild rechts).

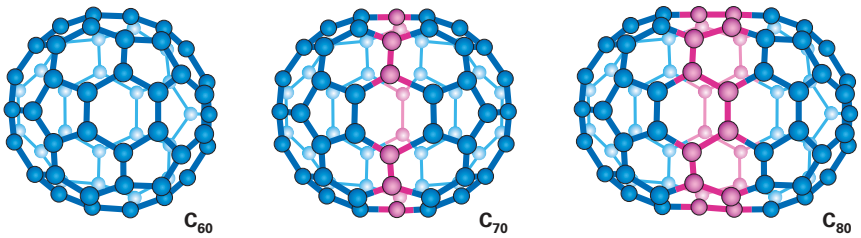
Dieser Standardfußball setzt sich aus 32 Polygonen (Vielecken) zusammen. Zwölf Fünfecke und 20 Sechsecke sind so angeordnet, dass jedes Fünfeck ausschließlich von Sechsecken umgeben ist. Traditionell sind die Fünfecke schwarz und die Sechsecke weiß gefärbt. Das Farbschema wurde angeblich zur Weltmeisterschaft 1970 eingeführt, um den Ball im Fernsehen besser sichtbar zu machen. Das Muster als solches ist allerdings älter.

Warum sieht der Fußball so aus, wie er aussieht? Kann man die Fünf- und Sechsecke auch anders anordnen? Dürfen es anstelle von Fünf- und Sechsecken andere Polygone sein? Fragen dieser Art sollen im Folgenden mit mathematischen Mitteln untersucht – und zum Teil auch beantwortet – werden.

Zu diesem Zweck ist die Frage »Was ist ein Fußball?« neu zu stellen, und die Antwort der Fifa ist nicht die geeignetste. Unser mathematischer Ball ist zwar auch noch »rund«, aber in einem verallgemeinerten Sinne. Er ist ein »sphärisches Polyeder«, was nichts weiter heißt, als dass er aus Polygonen zusammengesetzt ist und Kugelform annimmt, wenn man ihn geeignet aufbläst. Das ist nicht besonders restriktiv; selbst ein Würfel ist ein sphärisches Polyeder. Erst wenn beim Aufblasen keine Kugel, sondern beispielsweise ein Fahrradschlauch (Torus) herauskommt, nennt man das Polyeder nicht mehr sphärisch.

Außerdem interessiert uns nicht wirklich, wie das Aufblasen vonstatten geht und wo genau dabei die Ecken und Kanten des Polyeders auf der Kugeloberfläche (Sphäre) landen. Wir nehmen uns zum Beispiel die Freiheit, einen Eckpunkt auf der Sphäre zu verschieben (wobei die Kanten, die diesen Eckpunkt mit anderen verbinden, mitgehen). Nur einander überkreuzende Kanten dürfen dabei nicht entstehen. Nach unserer Definition ändert das nichts Wesentliches am Polyeder.

Mit anderen Worten: Es geht nicht um die metrischen, sondern um die topologischen Eigenschaften sphärischer Polyeder. Was von dem Fußball bleibt, ist ein so genannter Graph auf der Sphäre, bestehend aus Ecken und Kanten, die diese Ecken verbinden, ohne dass es auf deren genaue Lage ankommt. Aber trotz dieser Abstraktion: Fünfeck bleibt Fünfeck, und man kann nach wie vor davon reden, ob Fünfecke nur an Sechsecke oder auch aneinander grenzen und wie viele Flächen in einer bestimmten Ecke zusammenkommen.



AARON COX, NACH: RICHIRO SAITO

In einem Fulleren sitzen Kohlenstoffatome an den Ecken eines Polyeders; dessen Kanten entsprechen den Bindungen zwischen den Atomen. Das klassische Buckminsterfulleren C_{60} entspricht dem Standardfußball; von C_{70} und C_{80} gibt es jeweils mehrere kombinatorische Möglichkeiten.

DIETER KOTSCHICK

Auch der Informationspavillon »Football Globe«, der im Vorfeld der Weltmeisterschaft die Runde durch Deutschland machte, trägt das klassisch gewordene Design aus zwölf Fünf- und zwanzig Sechsecken.

Aus graphentheoretischer Sicht hat der Standardfußball drei wesentliche Eigenschaften:

(1) Er besteht nur aus Fünf- und Sechsecken;
(2) jedes Fünfeck grenzt nur an Sechsecke; und
(3) die Seiten jedes Sechsecks grenzen abwechselnd an Fünf- und Sechsecke.

Aus diesem Grund definieren wir einen Fußball als ein beliebiges sphärisches Polyeder mit den Eigenschaften (1), (2) und (3). Wir denken uns die Fünfecke schwarz und die Sechsecke weiß (was am Prinzip nichts ändert). Damit ist der Standardfußball mit der vertrauten Musterung auch in dem soeben definierten Sinn ein Fußball, allerdings nicht der einzig mögliche.

Dieser Definition bin ich 1983 zum ersten Mal als Schüler begegnet, in einer Aufgabe im Bundeswettbewerb Mathematik. Die Aufgabe lautete: Gegeben sei ein Fußball mit den Eigenschaften (1) bis (3). Aus wie vielen Fünf- und Sechsecken besteht er? Damals habe ich bei meiner Lösung angenommen, dass der Ball ein konvexes Polyeder sei, das aus regelmäßigen Polygonen besteht. Diese geometrische Voraussetzung erzwingt zusammen mit den Regeln (1) bis (3), dass es genau 12 Fünfecke und 20 Sechsecke gibt. Außerdem gibt es nur eine Möglichkeit, sie zusammenzusetzen, und diese liefert den Standardfußball. Aber ohne die geometrische Zusatzbedingung hat das graphentheoretische Problem unendlich viele weitere Lösungen.

Als ich im Jahr 2001 zu einem Vortrag anlässlich einer Preisverleihung des Bundeswettbewerbs eingeladen wurde, begann ich wieder, über dieses Problem nachzudenken. Schließlich fand ich zusammen mit meinem Mitarbeiter Volker Braungardt eine Beschreibung aller Lösungen, die ich im Folgenden diskutieren möchte.

Fullerene

Interessanterweise tauchte ein verwandtes Problem in den 1980er Jahren in der Chemie auf, nachdem das Buckminsterfulleren C_{60} entdeckt worden war. Das ist ein Molekül aus 60 Kohlenstoffatomen, deren räumliche Anordnung genau dem Standardfußball entspricht: Die 60 Atome sitzen an den Ecken des Polyeders, und die Kanten entsprechen chemischen Bindungen.

Die Entdeckung dieses Moleküls, die 1996 mit dem Nobelpreis für Chemie gewürdigt wurde (Spektrum der Wissenschaft 12/1996, S. 18), sorgte für ein großes Interesse an den so genannten Fullerenen (Bild links unten). Das sind Kohlenstoffmoleküle, deren räumliche Struktur die Eigenschaft (1) hat und außerdem die folgende Bedingung erfüllt, die von den chemischen Bindungseigenschaften des Kohlenstoffs erzwungen wird:

(3') An jeder Ecke treffen sich genau drei Kanten.

Manchmal interessiert man sich für die speziellen Fullerene, die zusätzlich Bedingung (2) erfüllen. Man nimmt an, dass sie besonders stabil sind; vermutlich ist es der Stabilität abträglich, wenn zwei Fünfecke benachbart sind.

Es gibt unendlich viele Fulleren-Polyeder – C_{60} war nur das erste, das als Molekül nachgewiesen wurde –, und es ist bemerkenswert, dass die beiden unendlichen Familien von Polyedern, Fußbälle und Fullerene, nur den Standardfußball miteinander gemein haben.

Um das einzusehen, ist die schöne Polyederformel hilfreich, die der Schweizer Mathematiker Leonhard Euler (1707–1783) entdeckt hat. In jedem sphärischen Polyeder ist die Anzahl e der Ecken minus die Anzahl k der Kanten plus die Anzahl f der Flächen gleich 2:

$$e - k + f = 2$$

Wenden wir Eulers Formel auf ein Polyeder aus S schwarzen Fünfecken und W weißen Sechsecken an. Die Gesamtzahl f der Flächen ist $S + W$. Die Fünfecke haben insgesamt $5S$ Kanten und die Sechsecke $6W$. Beides zusammen wäre die Gesamtanzahl der Kanten – nur haben wir jede Kante doppelt gezählt, nämlich bei den beiden Flächen, zu denen sie gehört. Zum Ausgleich teilen wir durch 2. Die Anzahl der Kanten ist somit

$$k = \frac{5S+6W}{2}$$

Schließlich sind die Ecken zu zählen. Die Fünfecke haben zusammen $5S$ und ▷

VISUALISIERUNGEN DIESER DOPPELSEITE: MICHAEL TROTT

So macht man durch verzweigte Überlagerung aus einem Fußball einen neuen: Man wähle einen Weg von einer Ecke zu einer anderen entlang von Kanten (*a*), begradige ihn (*b*) und schneide den Ball entlang dieses Wegs auf (*c*), schrumpfe ihn in der Breite auf die Hälfte zusammen (*d*) und vernähe zwei Exemplare dieses Gebildes (*e*), um 180 Grad gegeneinander gedreht, miteinander (*f*). Der Ästhetik zuliebe kann man die ursprüngliche Zickzackform der Naht wiederherstellen (*g*). Die Bilder der (mathematischen) Fußbälle hat Michael Trott von Wolfram Research Inc. mit dem Programm »Mathematica« erzeugt.

die Sechsecke $6W$ Ecken. Im Fall der Fullerene gehört nach Bedingung (3') jede Ecke zu drei verschiedenen Flächen. In der Summe $5S+6W$ ist also jede Ecke genau dreimal gezählt, und wir müssen zum Ausgleich durch 3 teilen:

$$e = \frac{5S+6W}{3}$$

Setzen wir diese Werte für f, k und e in die Euler'sche Formel ein, so stellen wir fest, dass die Beiträge von W sich gegenseitig wegheben und die Formel sich auf $S=12$ reduziert. Jedes Fulleren enthält genau 12 Fünfecke! Dagegen ergibt sich aus der Euler'schen Formel keine Einschränkung für die Anzahl W der Sechsecke und mithin der Ecken. Man kann zeigen, dass unter der Zusatzbedingung (2) die Anzahl der Sechsecke mindestens 20 sein muss. Der Standardfußball realisiert diesen Mindestwert. Die Anzahl e der Ecken ist dann 60, entsprechend den 60 Atomen im C_{60}-Molekül.

Für unsere mathematischen Fußbälle ist die Anzahl der Flächen, die sich in einer Ecke treffen, nicht festgelegt – Bedingung (3') gilt nicht –, aber drei müssen es mindestens sein. Daher wird aus der Gleichung $e=(5S+6W)/3$ die Ungleichung $e \leq (5S+6W)/3$. Setzen wir das in die Euler'sche Formel ein, so heben sich die Beiträge von W wieder gegenseitig auf. Übrig bleibt die Ungleichung $S \geq 12$. Somit enthält jeder Fußball mindestens 12 Fünfecke, doch anders als ein Fulleren kann er sehr wohl mehr enthalten.

Ebenfalls im Unterschied zu Fullerenen bestimmt bei einem Fußball die Anzahl der Fünfecke die der Sechsecke und umgekehrt. Wir zählen die Kanten, an denen Fünf- und Sechsecke zusammenstoßen. Nach Bedingung (2) sind alle Kanten von Fünfecken auch Kanten von Sechsecken, und nach Bedingung (3) ist jede zweite Sechseckskante gleichzeitig Kante eines Fünfecks. Daraus folgt $(1/2)(6W)=5S$, also $3W=5S$. Wegen $S \geq 12$ ist W mindestens 20. Diese Mindestwerte werden vom Standardfußball realisiert, und die Realisierung ist wegen der Bedingungen (2) und (3) kombinatorisch eindeutig. Allerdings hat die Gleichung $3W=5S$ unendlich viele weitere ganzzahlige Lösungen; entsprechen diese Fußballpolyedern? Es wird sich zeigen, dass dies genau für diejenigen Lösungen der Fall ist, bei denen W ein Vielfaches von 20 und S ein Vielfaches von 12 ist. Es gibt also tatsächlich eine unendliche Schar von Fußbällen.

Damit wissen wir, dass es unendlich viele Fullerene – mit den Eigenschaften (1), (2) und (3') – und unendlich viele Fußbälle – mit (1), (2) und (3) – gibt. Aber diese beiden unendlichen Mengen haben nur ein gemeinsames Element! Für ein Fulleren ist $S=12$, für einen Fußball gilt $5S=3W$. Soll ein Fußball gleichzeitig ein Fulleren sein, so schließen wir, dass $5 \cdot 12 = 3W$ oder $W=20$. Jeder Fußball, der zugleich ein Fulleren ist, muss also 12 Fünfecke und 20 Sechsecke haben. Es ist bekannt, dass es 1812 verschiedene Fullerene mit 12 Fünfecken und 20 Sechsecken gibt, doch 1811 davon haben Fünfecke mit einer gemeinsamen Kante und sind daher keine Fußbälle, weil sie die Bedingung (2) verletzen. Der Standardfußball ist das einzige dieser Fullerene mit disjunkten Fünfecken.

Neue Fußbälle aus alten

Lassen wir nun die Chemie beiseite und kommen zur eigentlichen Frage: Welche weiteren Fußbälle gibt es außer dem Standardfußball, und wie können wir sie verstehen? Es stellt sich heraus, dass man durch eine topologische Konstruktion namens »verzweigte Überlagerung« aus einem Fußball einen anderen machen kann. Das Spiel lässt sich beliebig oft wiederholen, sodass unendliche Folgen verschiedener Fußbälle entstehen.

Was ist eine verzweigte Überlagerung? Stellen Sie sich das Muster eines Fußballs, zum Beispiel des Standardfußballs, auf die Erdoberfläche aufgetragen vor, und zwar so, dass eine Ecke auf den Nordpol und eine andere auf den Südpol fällt (Bild oben, *a*). Nun verzerren Sie das Muster so, dass einer der (Zickzack-)Wege, die an Kanten entlang von Pol zu Pol führen, begradigt wird und auf einen Längengrad zu liegen kommt, zum Beispiel den Nullmeridian (*b*). Diese Verzerrung ist erlaubt; wir betreiben ja Topologie und nicht Geometrie.

Achtblättrige verzweigte Überlagerung eines Standardfußballs

Als Nächstes schneiden Sie in Gedanken mit einem Messer entlang der soeben begradigten Linie von Pol zu Pol und ziehen die derart aufgeschlitzte Erdoberfläche in Ost-West-Richtung zusammen (*c*), bis sie nur noch die Hälfte der Kugel bedeckt, zum Beispiel die westliche Halbkugel (*d*). Fertigen Sie schließlich eine Kopie dieser zusammengestauchten Fläche an und drehen Sie sie um die Erdachse, bis sie die östliche Halbkugel bedeckt (*e*). Dann passen die Fussballmuster der beiden Stücke zusammen, sodass man sie zu einem neuen Fussball zusammennähen kann. An den beiden vom Nord- zum Südpol verlaufenden Nähten treffen sich nämlich Teilstücke – eins vom Original, eins von der Kopie –, die genau so aussehen wie die Teilstücke, die wir durch Aufschlitzen voneinander getrennt hatten. Das Ergebnis ist ein Fußball mit doppelt so vielen Fünf- und Sechsecken wie zuvor (*f*, *g*).

Man bezeichnet den so konstruierten Fußball als zweiblättrige verzweigte Überlagerung des ursprünglichen Fußballs; die Pole heißen Verzweigungspunkte. Wenn man den neuen Ball nur lokal betrachtet, das heißt den Blick nur auf einzelne Ecken und deren Umgebungen richtet, sieht er topologisch genau so aus wie der alte, außer an den Verzweigungspunkten. An diesen beiden Ecken stoßen jetzt sechs statt drei Flächen zusammen; an den übrigen 116 Ecken (den 58 Ecken, die nicht auf die Pole gelegt wurden, und ihren Kopien) treffen sich wie zuvor jeweils drei Flächen.

Von der lokalen zur globalen Struktur

Es gibt eine nahe liegende Variante dieser Konstruktion. Man ziehe die geschlitzte Erdoberfläche in der Breite nicht nur auf die Hälfte, sondern auf ein Drittel, Viertel, … *d*-tel zusammen, sodass sie wie ein Stück Melonenschale aussieht (die Melone wurde in *d* Teile zerschnitten), und lege dann *d* Exemplare dieses Schalenstücks um die Erde. Wieder lassen sich alle Stücke so zusammennähen, dass ein Fußballmuster entsteht. Das ist eine *d*-blättrige verzweigte Überlagerung (Bild links unten). Für große Werte von *d* sind die Fünf- und Sechsecke zwar bis zur Unkenntlichkeit gestaucht, aber das macht nichts: Auf Längen und Winkel kommt es in der Topologie nicht an.

Aber erreicht man durch diese Konstruktion jeden überhaupt denkbaren Fußball? Überraschenderweise ja. Braungardt und ich haben bewiesen, dass jeder Fußball eine verzweigte Überlagerung des Standardfußballs ist. Allerdings kommen dabei auch allgemeinere Überlagerungen vor, die sich nicht aus den hier geschilderten zyklischen Überlagerungen zusammensetzen lassen.

Der Beweis beruht auf einem interessanten Zusammenspiel zwischen der lokalen Struktur von Fußballmustern und der globalen Struktur verzweigter Überlagerungen. Wir betrachten irgendeine Ecke eines beliebigen Fußballs (Bild rechts unten). Jede Fläche, die der Ecke anliegt, hat zwei aufeinander folgende Kanten, die sich in dieser Ecke treffen. Weil nach Bedingung (3) wenigstens eine dieser beiden Kanten ein Fünfeck berandet, gibt es keine Ecke, an der sich nur Sechsecke treffen. Also liegt an jeder Ecke ein Fünfeck an. Seine Nachbarn sind Sechsecke, und die Seiten der Sechsecke grenzen abwechselnd an Fünf- und Sechsecke.

Diese Bedingung ist nur erfüllbar, wenn die Flächen um die Ecke herum in der Reihenfolge schwarz, weiß, weiß, schwarz, weiß, weiß und so weiter angeordnet sind. (Zur Erinnerung: Die Fünfecke sind schwarz.) Damit sich das Muster um die Ecke herum schließt, muss die Anzahl der an der Ecke anliegenden Flächen ein Vielfaches von 3 sein. Folglich sieht das Muster in der Umgebung jeder Ecke so aus wie eine verzweigte Überlagerung des Standardfußballs bei einem Verzweigungspunkt.

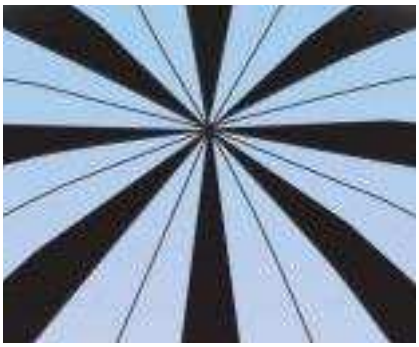
Das ist zwar nur eine lokale Information; aber die Überlagerungstheorie – der Teil der Topologie, der Abbildungen zwischen Räumen untersucht, die lokal gleich aussehen – erlaubt es, daraus Schlüsse auf globale Eigenschaften zu ziehen und insbesondere zu beweisen, dass tatsächlich jeder Fußball eine verzweigte Überlagerung des Standardfußballs ist.

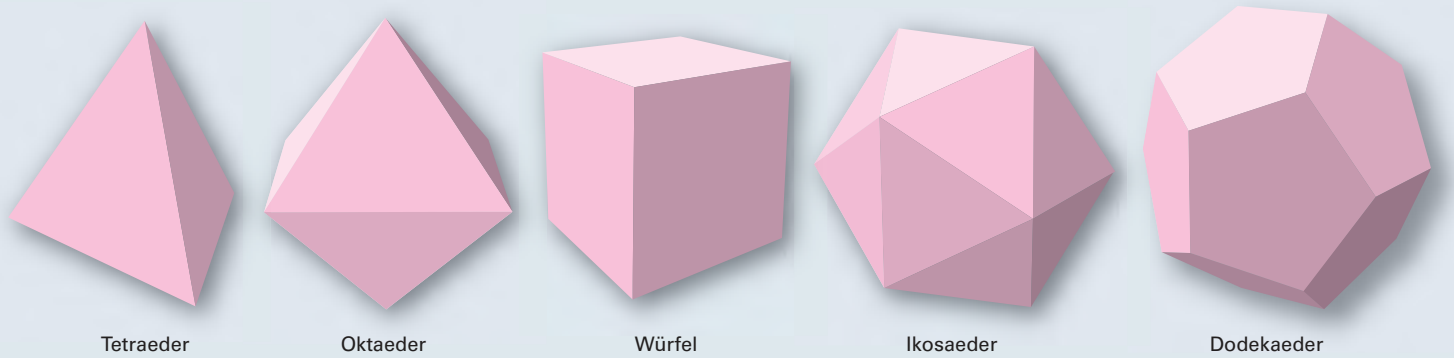
Jenseits der Fünf- und Sechsecke

Das Verallgemeinern liegt dem Mathematiker im Blut. Kaum hat er ein Ergebnis, schaut er nach, welche der verwendeten Voraussetzungen er wirklich braucht und welche vielleicht entbehrlich sind. In unserem Fall stellt sich rasch heraus, dass wir von der Tatsache, dass Fußbälle aus Fünf- und Sechsecken bestehen, nirgends Gebrauch gemacht haben. Führen wir also verallgemeinerte Fußbälle ein!

Das sind Polyeder, die immer noch Flächen zweier Arten haben, schwarze mit je s Kanten und weiße mit je w Kanten. Aber wir bestehen nicht mehr darauf, dass $s = 5$ und $w = 6$ ist. Allerdings ▷

Bei einem (mathematischen) Fußball liegen um jede Ecke die Flächen in der Reihenfolge schwarz, weiß, weiß, schwarz, weiß, weiß und so weiter. Insbesondere ist die Gesamtzahl dieser Flächen ein Vielfaches von 3.





Die fünf platonischen Körper

SIGANIM / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

▷ sollen immer noch die schwarzen Flächen nur zu weißen Flächen benachbart sein und an den Kanten weißer Flächen abwechselnd schwarze und weiße Flächen anliegen – woraus folgt, dass w eine gerade Zahl sein muss.

Wir können noch einen Schritt weiter gehen, indem wir verlangen, dass eine weiße Fläche nur an jeder n-ten Kante eine schwarze Fläche trifft und dass alle übrigen benachbarten Flächen weiß sind. Dann muss w ein Vielfaches von n sein; das heißt $w = m \cdot n$ für eine ganze Zahl m. Nach wie vor sollen schwarze Flächen nur an weiße grenzen.

Das Farbschema eines derart verallgemeinerten Fußballs wird also durch die drei ganzen Zahlen (s, m, n) beschrieben; dabei ist s die Anzahl der Kanten einer schwarzen Fläche, $w = m \cdot n$ die Anzahl der Kanten einer weißen Fläche, und jede n-te Kante einer weißen Fläche grenzt an eine schwarze. Welche Kombinationen von s, m und n sind überhaupt möglich? Die Antwort hängt eng mit den regulären Polyedern zusammen.

Die Polyeder mit der größtmöglichen Symmetrie sind die platonischen Körper: Alle ihre Flächen sind gleichseitige Polygone mit der gleichen Anzahl von Kanten, und an jeder Ecke des Polyeders treffen sich gleich viele Flächen. Euklid hat in seinen »Elementen« bewiesen, dass es nur fünf solche Polyeder gibt: das Tetraeder, das Oktaeder, den Würfel, das Ikosaeder und das Dodekaeder (Bild oben).

Heutzutage wissen wir, dass der Beweis nicht von der metrischen Eigenschaft »Gleichseitigkeit« abhängt. Das folgende topologische Argument, das nur die Euler'sche Polyederformel benutzt, zeigt, dass es neben den fünf genannten Polyedern keine weitere Möglichkeit gibt.

Jeder platonische Körper wird durch zwei Zahlen beschrieben: die Anzahl K der Ecken jeder Fläche und die Anzahl M der Flächen, die sich in jeder Ecke treffen. Ist f die Anzahl der Flächen, dann gilt für die Gesamtzahl der Kanten $k = (1/2)Kf$ und für die Anzahl der Ecken $e = (1/M)Kf$. Setzen wir diese Werte in die Euler'sche Formel $e - k + f = 2$ ein, so führen elementare Umformungen auf die Gleichung

$$\frac{1}{Kf} + \frac{1}{4} = \frac{1}{2K} + \frac{1}{2M}$$

Die möglichen Lösungen lassen sich leicht bestimmen. Für das Zahlenpaar (K, M) kommen nur die folgenden Werte in Frage:

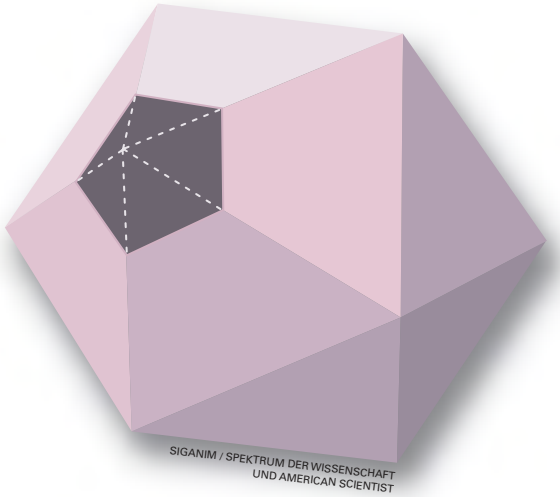
- (3, 3) für das Tetraeder;
- (4, 3) für den Würfel und (3, 4) für das Oktaeder;
- (5, 3) für das Dodekaeder und (3, 5) für das Ikosaeder.

Hinzu kommen die Möglichkeiten $K = 2$ und M beliebig sowie $M = 2$ und K beliebig. Sie sind nicht durch Polyeder im üblichen Sinn realisierbar, aber der erste Fall entspricht M Zweiecken in Gestalt von Melonenschalenstücken, die sich sämtlich an zwei Punkten treffen. Der amerikanische Football ist nach diesem Muster genäht.

Konstruktion verallgemeinerter Fußbälle

Damit haben wir einen vollständigen Überblick über die Polyeder, die nur eine Art Flächen (nämlich K-Ecke) und nur eine Art Ecken (nämlich solche mit M Flächen) haben. Was wir suchen, sind aber Polyeder mit genau zwei Arten Flächen – schwarze und weiße –, die noch gewisse Zusatzbedingungen erfüllen. Wie kann man die aus regulären Polyedern herstellen? Eine mögliche Antwort ist: durch Entecken oder auch Abstumpfen. Man schneidet einem regulären Polyeder alle Ecken mitsamt etwas Umgebung ab. Was dabei von den Flächen des ursprünglichen Polyeders übrig bleibt, bildet die eine Art Flächen; die andere Art sind die Schnittflächen.

Für das Ikosaeder sieht das so aus: An jeder seiner zwölf Ecken kommen fünf Flächen zusammen. Durch Abschneiden jeder Ecke entsteht ein Fünfeck, und die zwanzig Dreiecke werden zu Sechsecken zurechtgestutzt (Bild links). Die Kanten jedes Sechsecks sind im Wechsel die Überreste der ursprünglichen Ikosaederkanten und die neu entstandenen Kanten zu den Schnittflächen. Mit den Kanten der ersten Art grenzt das Sechseck an ein weiteres ▷

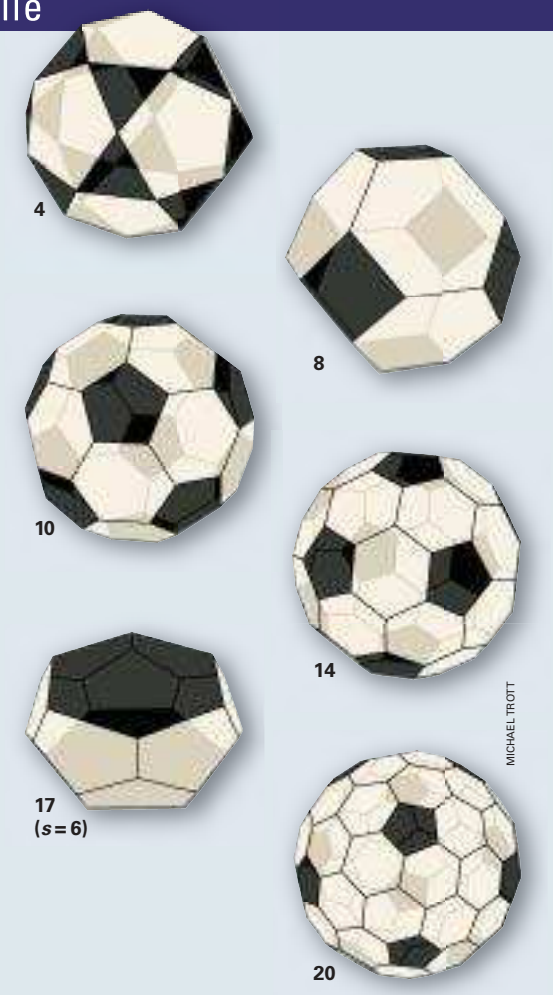


SIGANIM / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT UND AMERICAN SCIENTIST

Jeder platonische Körper wird durch Entecken (Abstumpfen) zu einem verallgemeinerten Fußball. Aus dem Ikosaeder entsteht der Standardfußball: Die zwölf Ecken werden zu Fünfecken und die zwanzig Dreiecke zu Sechsecken.

Die Klassifizierung der verallgemeinerten Fußbälle

Typ	s	m	n	minimale Realisierung	S	W
1	3	3	1	Oktaeder	4	4
2	3	4	1	Kuboktaeder	8	6
3	4	3	1	Kuboktaeder	6	8
4	3	5	1	Ikosidodekaeder	20	12
5	5	3	1	Ikosidodekaeder	12	20
6	3	3	2	Tetraederstumpf	4	4
7	3	4	2	Würfelstumpf	8	6
8	4	3	2	Oktaederstumpf	6	8
9	3	5	2	Dodekaederstumpf	20	12
10	5	3	2	Ikosaederstumpf = Standardfußball	12	20
11	≥3	2	2	abgestumpfter amerikanischer Football oder s-seitiges Prisma	2	s
12	3	2	3	entkantetes Tetraeder	4	6
13	4	2	3	entkanteter Würfel	6	12
14	5	2	3	entkantetes Dodekaeder	12	30
15	≥3	1	3	einseitig abgestumpfter amerikanischer Football oder s-seitige Pyramide	1	s
16	≥3	1	4	doppeltes s-seitiges Prisma	2	$2s$
17	≥3	1	5	verdrehtes doppeltes s-seitiges Prisma	2	$2s$
18	3	1	6	bekränztes Tetraeder	4	12
19	4	1	6	bekränzter Würfel	6	24
20	5	1	6	bekränztes Dodekaeder	12	60



Ein verallgemeinerter Fußball ist ein Polyeder mit zwei Arten Flächen: schwarzen mit s Seiten und weißen mit $w = m \cdot n$ Seiten, wobei jede n-te Seite einer weißen Fläche an eine schwarze grenzt.

Jeder der hier aufgeführten zwanzig Typen enthält außer dem in der Tabelle genannten Exemplar mit der kleinstmöglichen Anzahl S schwarzer Flächen (und der zugehörigen Anzahl W an weißen Flächen) unendlich viele Realisierungen mit größeren Flächenzahlen.

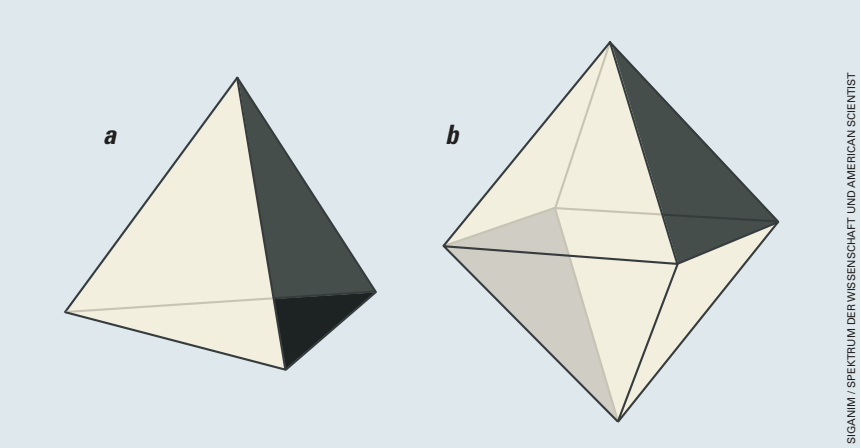
Nicht alle in der Tabelle aufgeführten Polyeder haben etablierte Namen. Die minimalen Realisierungen der Typen 12 bis 14 werden durch Entkanten aus platonischen Körpern hergestellt. Dabei schneidet man, analog zum Abschneiden der Ecken beim Abstumpfen, Umgebungen ganzer Kanten ab (das Messer wird parallel zur Kante geführt). Insgesamt wird jede Fläche des Polyeders zu einer kleineren Version ihrer selbst und jede Kante zu einem Sechseck.

Alternativ kann man das entkantete Tetraeder (12) konstruieren, indem man den Würfel an vier Ecken abstumpft, von denen keine zwei benachbart sind.

Die minimalen Realisierungen der Typen 18 bis 20 entstehen aus platonischen Körpern, indem man jede Seitenfläche mit einem Kranz von Sechsecken umgibt, und zwar so, dass jede Ecke des neuen Polyeders dreizählig wird. Das bekränzte Tetraeder (18) kann man auch direkt aus dem Dodekaeder konstruieren, indem man vier geeignet gewählte Ecken abstumpft.

Ein s-seitiges Prisma ist eine Dose mit einem s-Eck als Grundfläche, einem gleichen s-Eck als Deckfläche und viereckigen Seitenwänden. Stapelt man zwei solche Prismen Grundfläche auf Deckfläche aufeinander und entfernt die Trennfläche zwischen beiden Geschossen, so entsteht das doppelte s-seitige Prisma (Typ 16). Dort, wo die beiden Geschosse aneinander stoßen, hat man s vierzählige Ecken, denen lauter Vierecke anliegen.

Beim verdrehten s-seitigen Doppelprisma (Typ 17) werden ebenfalls zwei s-seitige Prismen aufeinander gestapelt und die Trennfläche entfernt. Allerdings werden die beiden Prismen gegeneinander verdreht, sodass die Ecken des Obergeschosses auf den Kanten des Untergeschosses liegen und umgekehrt. Dies funktioniert, wenn man sich das Prisma tatsächlich als Dose vorstellt, also mit runden Deckeln statt mit s-eckigen. Durch die Verdrehung liegen in der Mitte nun nicht s vierzählige Ecken, sondern $2s$ dreizählige. Die Seitenflächen sind daher Fünfecke, nicht Vierecke. Man kann das verdrehte Doppelprisma auch herstellen, indem man zwei s-Ecke mit je einem Ring von Fünfecken umgibt und die beiden Ringe dann entlang einer Zickzacklinie aneinander fügt (siehe Bild oben, dort mit $s = 6$).



SIGANIM / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT UND AMERICAN SCIENTIST

Sowohl ein Tetraeder mit einer schwarzen Fläche (*a*) als auch ein Oktaeder mit zwei gegenüberliegenden schwarzen Flächen (*b*) sind Realisierungen des Schemas (*s, m, n*) = (3, 1, 3), gehen aber nicht durch verzweigte Überlagerung auseinander hervor.

Sechseck, mit denen der zweiten Art an ein Fünfeck. Das ist nichts anderes als der Standardfußball! Mathematiker nennen ihn den Ikosaederstumpf.

Dieselbe Prozedur ist auch auf die übrigen platonischen Körper anwendbar. So besteht der Tetraederstumpf aus Dreiecken und Sechsecken, wobei die Dreiecke nur an Sechsecke grenzen und die Sechsecke abwechselnd an Dreiecke und Sechsecke. Es handelt sich um einen verallgemeinerten Fußball mit $s = 3$, $m = 3$, $n = 2$ (und $w = m \cdot n = 6$). Der Ikosaederstumpf (Standardfußball) hat $s = 5$, $m = 3$ und $n = 2$. Die übrigen Abstumpfungen ergeben (s, m, n) = (4, 3, 2) für das Oktaeder, (3, 4, 2) für den Würfel, (3, 5, 2) für das Dodekaeder sowie (s, 2, 2) mit beliebigem $s > 2$ für den entsprechenden amerikanischen Football.

Sind das die einzigen Möglichkeiten für verallgemeinerte Fußballmuster oder gibt es weitere? Wiederum können wir die Frage mit Hilfe der Euler'schen Formel beantworten. Genau wie bei den platonischen Körpern können wir die Anzahl der Flächen, Kanten und Ecken durch die Daten des Musters ausdrücken, und zwar hier die Anzahl S der schwarzen Flächen, die Anzahl W der weißen Flächen und die Parameter s, m und n. Diesmal ist die Anzahl der Flächen, die sich an einer Ecke treffen, nicht festgelegt; sie muss aber wie oben mindestens gleich 3 sein. Daraus ergibt sich die folgende Bedingung an die Daten des Musters:

$$\frac{1}{sS} + \frac{n+1}{12} \leq \frac{1}{2s} + \frac{1}{2m}$$

Das sieht kompliziert aus, lässt sich jedoch leicht analysieren, ähnlich der Gleichung, die auf die platonischen Körper führt. Es ist nicht schwer zu zeigen, dass n höchstens 6 sein kann, weil sonst die linke Seite größer als die rechte würde. Mit etwas mehr Aufwand können wir eine vollständige Liste aller möglichen Lösungen aufstellen.

Ordentliche und unordentliche Fußbälle

Allerdings ist die Arbeit damit noch nicht getan. Es gibt Tripel wie etwa (s, m, n) = (4, 4, 1), welche die Ungleichung für geeignete Werte von S erfüllen, ohne dass sich entsprechende verallgemeinerte Fußbälle konstruieren ließen. Braungardt und ich haben die Werte von (s, m, n) bestimmt, die durch verallgemeinerte Fußbälle realisiert werden; sie sind in der Tabelle (Kasten S. 113) aufgeführt. Für $n = 2$ sind die kleinsten Realisierungen aller Muster abgestumpfte platonische Körper.

Neben dem Standardfußball (Typ 10) enthält die Tabelle drei weitere Fullerene: die Typen 14 und 20 und Typ 17 für $s = 6$. Die Anzahl der Sechsecke ist in diesen Fällen 30, 60 beziehungsweise 2 (wobei im letzten Fall die Sechsecke die schwarzen sind). Die entsprechenden Fullerenmoleküle haben 80, 140 beziehungsweise 24 Kohlenstoffatome. Während das 24-atomige Fulleren eindeutig bestimmt ist, gibt es bei 80 Atomen sieben verschiedene Anordnungen mit disjunkten Fünfecken, von denen nur eine (und zwar nicht die im Bild S. 108 gezeigte) ein verallgemeinerter Fußball ist, und bei 140 Atomen 121 354 Stück.

Hat man einen verallgemeinerten Fußball, so kann man durch eine verzweigte Überlagerung einen weiteren Fußball desselben Typs, das heißt mit denselben Werten (s, m, n), daraus machen. Aber was wir oben für den Standardfußball ausgeführt haben, nämlich dass diese Konstruktionsmethode die Menge aller verallgemeinerten Fußbälle ausschöpft, gilt nicht mehr uneingeschränkt. Es gilt für $n = 2$, das heißt, wenn weiße Flächen entlang ihren Kanten abwechselnd an schwarze und weiße Nachbarn stoßen. Aber die Aussage ist falsch für andere Werte von n. Das einfachste Gegenbeispiel ist (s, m, n) = (3, 1, 3): Das Polyeder besteht aus lauter Dreiecken; die schwarzen grenzen nur an weiße und jedes weiße an genau ein schwarzes. Das minimale Beispiel ist ein Tetraeder, bei dem eine Fläche schwarz ist. Eine weitere Realisierung ist das Oktaeder, von dem zwei gegenüberliegende Flächen schwarz sind (Bild oben). Aber das ist keine verzweigte Überlagerung des gefärbten Tetraeders! Dann müssten nämlich an jeder Ecke 3 oder 6 oder 9 … Flächen zusammenstoßen, beim Oktaeder aber sind es vier.

Der Fall $n = 2$ ist in einem gewissen Sinn ordentlicher als alle anderen. Denn wie beim Standardmuster mit Fünf- und Sechsecken (siehe oben) müssen alle Ecken im Wesentlichen gleich aussehen: Die einer Ecke anliegenden Flächen haben dieselbe Farbfolge, nämlich schwarz, weiß, weiß, schwarz, weiß, weiß und so weiter, nur die Länge der Folge ist offen. Die lokale Struktur eines verallgemeinerten Fußballs mit $n = 2$ ist also durch diese kombinatorischen Bedingungen schon weit gehend festgelegt. Diese Kontrolle fehlt im Fall $n \neq 2$. In der Tat haben die

Man erkennt die Vier- und Sechsecke nur mühsam; aber der für die laufende Weltmeisterschaft neu eingeführte Fußball »Teamgeist« ist topologisch ein Oktaederstumpf.

Ecken des gefärbten Oktaeders (Bild links, *b*) die Farbfolge schwarz, weiß, weiß, weiß, und beim gefärbten Tetraeder kommen sogar zwei verschiedene Farbfolgen vor. Daher können wir jetzt zwar alle verallgemeinerten Fußbälle mit $n = 2$ beschreiben: Sie sind verzweigte Überlagerungen abgestumpfter platonischer Körper. Doch verfügen wir über kein einfaches Verfahren, das sämtliche verallgemeinerten Fußbälle mit $n > 2$ hervorbringt.

Coda

Sie werden es schon geahnt haben: Das Ziel unserer Überlegungen war nicht in erster Linie die Konstruktion von Bällen, die man gut treten kann. Von unserem Standpunkt aus sind unter anderen die Fußbälle besonders interessant, mit denen man gar nicht richtig spielen kann: Sie haben die Form eines Torus, einer Brezel oder einer Oberfläche mit noch mehr Löchern. Denn jede dieser Flächen ist – in einem etwas verallgemeinerten Sinn – eine verzweigte Überlagerung der Kugeloberfläche. Unsere Konstruktionen für Fußballmuster lassen sich also auf diese Flächen übertragen. Dies ist nur ein sehr einfaches Beispiel für die engen Beziehungen zwischen Graphen auf Flächen und verzweigten Überlagerungen, die in der modernen algebraischen Geometrie eine wesentliche Rolle spielen. Aber das ist eine andere Geschichte. ◁

Dieter Kotschick ist Professor für Mathematik und Inhaber des Lehrstuhls für Differentialgeometrie an der Universität München.

Dieser Artikel basiert auf dem Artikel »The topology and combinatorics of soccer balls«, der gleichzeitig in der Zeitschrift »American Scientist« erscheint. Der Autor bedankt sich bei Volker Braungardt und Allyn Jackson für ihre Unterstützung.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Bundeswettbewerb Mathematik. Aufgaben und Lösungen 1983–1987. Klett, Stuttgart 1988

The classification of football patterns. Von Dieter Kotschick und Volker Braungardt. Preprint, online unter http://129.187.111.185/~dieter/football.pdf

A constructive enumeration of fullerens. Von D. Brinkmann und A. Dress in: Journal of Algorithms, Bd. 23, S. 345, 1997

Regular polytopes. Von H. S. M. Coxeter. Dover, New York 1973

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

PREISRÄTSEL

Randen- und Radieschenprimzahlen

Von Willi Botta

Schneidet man eine Rande – auch Rote Rübe genannt – in Stücke, so ist jede Schnittfläche so rot wie die ganze Rande. Bei einem Radieschen hingegen ist nur die äußere Haut rot, die Schnittflächen sind weiß.

Dementsprechend nennen wir eine im Dezimalsystem geschriebene Primzahl eine Randenprimzahl, wenn jede ihrer aus zusammenhängenden Ziffern gebildete ein- oder mehrstellige Teilzahl wiederum eine Primzahl (oder 1) ist. So ist beispielsweise 173 eine Randenprimzahl, weil alle ihre Teilzahlen 1, 7, 3, 17 und 73 obige Bedingung erfüllen.

Im Gegensatz dazu ist 60 649 eine Radieschenprimzahl, denn die ganze Zahl ist zwar prim, aber alle Teilzahlen 6, 60, 606, 6064, 64, 649, 4, 49 und 9 sind zusammengesetzt.

Wie heißt die kleinste Radieschenprimzahl, und welches ist die größte Randenprimzahl?

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 10 48 40, D-69038 Heidelberg.

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir drei Jahrgangs-CD-ROMs Spektrum 2005. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 11. 7. 2006, eingehen.

Lösungen zu »Winzers Erbe« (Mai 2006)

Unter den fünf Kindern sind 45 Fässer verschiedenen Füllungsgrades zu verteilen. Wir messen den Inhalt jedes Fasses in Viertelfasseinheiten (VFE) und bezeichnen jedes Fass mit der Zahl (0, 1, 2, 3 oder 4), die den Füllungsgrad in VFE angibt.

Jedes Kind soll mindestens ein Fass von jedem Füllungsgrad bekommen. Durch diese Bedingung sind 25 Fässer bereits verteilt: Jedes Kind bekommt fünf Fässer mit zusammen 10 VFE Inhalt.

Nur die restlichen 20 Fässer sind noch so aufzuteilen, dass jedes Kind genau vier Fässer mit insgesamt 8 VFE bekommt.

Es gibt folgende Möglichkeiten, aus vier Fässern 8 VFE zusammenzustellen:

A:	4 + 4 + 0 + 0
B:	4 + 3 + 1 + 0
C:	4 + 2 + 2 + 0
D:	4 + 2 + 1 + 1
E:	3 + 3 + 2 + 0
F:	3 + 3 + 1 + 1
G:	3 + 2 + 2 + 1
H:	2 + 2 + 2 + 2

Aus diesen acht Möglichkeiten A bis H sind jetzt fünf derart auszuwählen, dass von jedem Füllungsgrad vier Fässer verwendet werden.

Damit die vier vollen Fässer ihren Abnehmer finden, muss ein Kind das Sortiment A bekommen; um die beiden restlichen vollen Fässer unterzubringen, stehen die Kombinationen B/C, B/D und C/D zur Verfügung.

Zu jeder dieser Möglichkeiten müssen noch zwei der vier Sortimente E, F, G, H ausgewählt werden. H scheidet in jedem Fall aus, da wir bereits mindestens ein halbvolles Fass verteilt haben.

Zu C/D passen nur noch E und F, da sonst nicht alle zu drei Vierteln gefüllten Fässer verteilt würden. Bei B/C sind schon alle leeren Fässer verteilt, was F/G erzwingt. Bei B/D sind drei der zu einem Viertel gefüllten Fässer verteilt, also bleibt nur E/G.

Insgesamt erhält man also folgende drei Lösungen für die Verteilung der Fässer auf die fünf Kinder: A/B/C/F/G, A/B/D/E/G und A/C/D/E/F. Dazu bekommt jedes Kind, wie oben erwähnt, noch ein Fass von jedem Füllungsgrad.

Die Gewinner der drei T-Shirts »Pioneer 11« sind Valentin Kreh, Nürnberg; Maresa Lehmann, Homburg und Henning Schulze, Karlsruhe.

Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet »Mathematik« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

Ecken des gefärbten Oktaeders (Bild links, *b*) die Farbfolge schwarz, weiß, weiß, weiß, und beim gefärbten Tetraeder kommen sogar zwei verschiedene Farbfolgen vor. Daher können wir jetzt zwar alle verallgemeinerten Fußbälle mit $n = 2$ beschreiben: Sie sind verzweigte Überlagerungen abgestumpfter platonischer Körper. Doch verfügen wir über kein einfaches Verfahren, das sämtliche verallgemeinerten Fußbälle mit $n > 2$ hervorbringt.

Coda

Sie werden es schon geahnt haben: Das Ziel unserer Überlegungen war nicht in erster Linie die Konstruktion von Bällen, die man gut treten kann. Von unserem Standpunkt aus sind unter anderen die Fußbälle besonders interessant, mit denen man gar nicht richtig spielen kann: Sie haben die Form eines Torus, einer Brezel oder einer Oberfläche mit noch mehr Löchern. Denn jede dieser Flächen ist – in einem etwas verallgemeinerten Sinn – eine verzweigte Überlagerung der Kugeloberfläche. Unsere Konstruktionen für Fußballmuster lassen sich also auf diese Flächen übertragen. Dies ist nur ein sehr einfaches Beispiel für die engen Beziehungen zwischen Graphen auf Flächen und verzweigten Überlagerungen, die in der modernen algebraischen Geometrie eine wesentliche Rolle spielen. Aber das ist eine andere Geschichte. ◁

Dieter Kotschick ist Professor für Mathematik und Inhaber des Lehrstuhls für Differentialgeometrie an der Universität München.

Dieser Artikel basiert auf dem Artikel »The topology and combinatorics of soccer balls«, der gleichzeitig in der Zeitschrift »American Scientist« erscheint. Der Autor bedankt sich bei Volker Braungardt und Allyn Jackson für ihre Unterstützung.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Bundeswettbewerb Mathematik. Aufgaben und Lösungen 1983–1987. Klett, Stuttgart 1988

The classification of football patterns. Von Dieter Kotschick und Volker Braungardt. Preprint, online unter http://129.187.111.185/~dieter/football.pdf

A constructive enumeration of fullerens. Von D. Brinkmann und A. Dress in: Journal of Algorithms, Bd. 23, S. 345, 1997

Regular polytopes. Von H. S. M. Coxeter. Dover, New York 1973

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

PREISRÄTSEL

Randen- und Radieschenprimzahlen

Von Willi Botta

Schneidet man eine Rande – auch Rote Rübe genannt – in Stücke, so ist jede Schnittfläche so rot wie die ganze Rande. Bei einem Radieschen hingegen ist nur die äußere Haut rot, die Schnittflächen sind weiß.

Dementsprechend nennen wir eine im Dezimalsystem geschriebene Primzahl eine Randenprimzahl, wenn jede ihrer aus zusammenhängenden Ziffern gebildete ein- oder mehrstellige Teilzahl wiederum eine Primzahl (oder 1) ist. So ist beispielsweise 173 eine Randenprimzahl, weil alle ihre Teilzahlen 1, 7, 3, 17 und 73 obige Bedingung erfüllen.

Im Gegensatz dazu ist 60 649 eine Radieschenprimzahl, denn die ganze Zahl ist zwar prim, aber alle Teilzahlen 6, 60, 606, 6064, 64, 649, 4, 49 und 9 sind zusammengesetzt.

Wie heißt die kleinste Radieschenprimzahl, und welches ist die größte Randenprimzahl?

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 10 48 40, D-69038 Heidelberg.

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir drei Jahrgangs-CD-ROMs Spektrum 2005. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 11. 7. 2006, eingehen.

Lösungen zu »Winzers Erbe« (Mai 2006)

Unter den fünf Kindern sind 45 Fässer verschiedenen Füllungsgrades zu verteilen. Wir messen den Inhalt jedes Fasses in Viertelfasseinheiten (VFE) und bezeichnen jedes Fass mit der Zahl (0, 1, 2, 3 oder 4), die den Füllungsgrad in VFE angibt.

Jedes Kind soll mindestens ein Fass von jedem Füllungsgrad bekommen. Durch diese Bedingung sind 25 Fässer bereits verteilt: Jedes Kind bekommt fünf Fässer mit zusammen 10 VFE Inhalt.

Nur die restlichen 20 Fässer sind noch so aufzuteilen, dass jedes Kind genau vier Fässer mit insgesamt 8 VFE bekommt.

Es gibt folgende Möglichkeiten, aus vier Fässern 8 VFE zusammenzustellen:

A:	4 + 4 + 0 + 0
B:	4 + 3 + 1 + 0
C:	4 + 2 + 2 + 0
D:	4 + 2 + 1 + 1
E:	3 + 3 + 2 + 0
F:	3 + 3 + 1 + 1
G:	3 + 2 + 2 + 1
H:	2 + 2 + 2 + 2

Aus diesen acht Möglichkeiten A bis H sind jetzt fünf derart auszuwählen, dass von jedem Füllungsgrad vier Fässer verwendet werden.

Damit die vier vollen Fässer ihren Abnehmer finden, muss ein Kind das Sortiment A bekommen; um die beiden restlichen vollen Fässer unterzubringen, stehen die Kombinationen B/C, B/D und C/D zur Verfügung.

Zu jeder dieser Möglichkeiten müssen noch zwei der vier Sortimente E, F, G, H ausgewählt werden. H scheidet in jedem Fall aus, da wir bereits mindestens ein halbvolles Fass verteilt haben.

Zu C/D passen nur noch E und F, da sonst nicht alle zu drei Vierteln gefüllten Fässer verteilt würden. Bei B/C sind schon alle leeren Fässer verteilt, was F/G erzwingt. Bei B/D sind drei der zu einem Viertel gefüllten Fässer verteilt, also bleibt nur E/G.

Insgesamt erhält man also folgende drei Lösungen für die Verteilung der Fässer auf die fünf Kinder: A/B/C/F/G, A/B/D/E/G und A/C/D/E/F. Dazu bekommt jedes Kind, wie oben erwähnt, noch ein Fass von jedem Füllungsgrad.

Die Gewinner der drei T-Shirts »Pioneer 11« sind Valentin Kreh, Nürnberg; Maresa Lehmann, Homburg und Henning Schulze, Karlsruhe.

Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet »Mathematik« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

Dem Tod zur Hand gehen

Seit acht Jahren erlaubt Oregon eine streng reglementierte Form der Sterbehilfe. In der deutschen Diskussion werden die Erfahrungen des US-Bundesstaats mit ihr aber ignoriert.

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen, siehe: www.spektrum.de/audio

Von Edgar Dahl

Patrick C. Robertson ist bereit, seinem Schöpfer gegenüberzutreten. Der 67-jährige Schriftsteller und Katholik aus Portland nimmt seine Krebserkrankung mit nahezu stoischer Gelassenheit hin. Wenn sich sein unheilbares Lungenkarzinom weiter ausbreitet, wird er die vier Fläschchen mit Pentobarbital-Tabletten öffnen und seinem Leben ein Ende setzen. Wann genau er dies tun wird, steht für ihn noch nicht fest. Doch er weiß, es wird ein Tag sein, bevor ihm Atemnot, Erbrechen und Schmerzen das Leben zur Hölle machen. An diesem Schicksalstag, so sagt er, werde er seine engsten Freunde um sich versammeln, seine kostbarsten Bücher verschenken und schließlich von all seinen Weggefährten einzeln Abschied nehmen. Keine Trauerfeier, sondern eine »Feier auf das Leben« soll es werden: »Ich will Satchmos ›What a Wonderful World‹ hören, wenn ich diese Welt verlasse.« Nach der Einnahme der Überdosis Schlafmittel erwartet er, binnen weniger Minuten friedlich einzuschlafen. »Ich habe mein Leben mit Anstand gelebt und will es auch so beenden.«

Dass er Zeit, Ort und Umstände seines Todes so genau planen kann, verdankt Robertson dem Umstand, in Oregon zu leben. In dem relativ kleinen Bundesstaat im Nordwesten der USA ist am 4. November 1997 der so genannte »Death With Dignity Act«, ein Gesetz zum Sterben in Würde, in Kraft getreten. Hervorgegangen aus einer Bürgerinitiative, erlaubt es unheilbar erkrankten Patienten, sich von ihrem Arzt eine tödliche Dosis eines Medikaments verschreiben zu lassen, mit dem sie sich für den Fall, dass ihr Leiden unerträglich wird, das Leben nehmen können.

Angesichts der anhaltenden Debatten in Deutschland um die Sterbehilfe lohnt sich der Blick auf ein Modell, das sich sowohl von der Praxis in den Niederlanden als auch von der in der Schweiz unterscheidet (siehe Kasten S. 118 und Tabelle S. 119). Ein unbefangener Blick auf Oregon mag helfen, einige der Fragen zu beantworten, die uns in Deutschland quälen: Würde eine Legalisierung des ärztlich-assistierten Suizids das für das Arzt-Patienten-Verhältnis so unerlässliche Vertrauen untergraben? Ließe sich eine Beihilfe zur Selbsttötung mit dem ärztlichen Ethos vereinbaren? Könnten unheilbar erkrankte Patienten möglicherweise dazu gedrängt werden, sich als eine »Belastung« für die Gesellschaft zu empfinden? Und: Würde uns die Legalisierung des ärztlich-assistierten Suizids nicht auf einen gefährlichen Weg führen, an dessen Ende womöglich eine »Pflicht zu sterben« steht?

Als Oregon sein Gesetz erließ, hatte das Department of Human Services, das mit der Überwachung des ärztlich-assistierten Suizids beauftragt wurde, ebenfalls noch keine Antworten auf diese beängstigenden Fragen. Nichtsdestotrotz ist man das Wagnis einge-

Ihre Meinung zu diesem kontrovers diskutierten Thema interessiert uns. Die Umfrage finden Sie unter www.spektrum.de/sterbehilfe.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

gangen, sich dem Willen der Mehrheit der Bevölkerung zu beugen und eine vom Rest der Vereinigten Staaten mit großer Skepsis betrachtete Sterbehilfepraxis einzuführen. Alles, was man hatte, war die Hoffnung, dass die vielen in das Gesetz eingebauten Sicherheitsvorkehrungen hinreichend vor einem möglichen Missbrauch schützen würden.

Jeder Dritte nahm das Mittel nicht

Ein Patient kann es nur in Anspruch nehmen, wenn er mehrere Bedingungen erfüllt. Er muss volljährig sein, seinen ständigen Wohnsitz in Oregon haben und an einer unbehandelbaren Erkrankung leiden, die voraussichtlich in weniger als sechs Monaten zum Tod führt. Ein unabhängiger Arzt muss mit dem verschreibenden Kollegen in der Diagnose und Prognose übereinstimmen. Hat auch nur einer der beiden den Verdacht, der Patient sei nicht urteilsfähig, ist ein psychologisches Gutachten einzuholen. Der Patient muss das Medikament bei seinem Arzt zweimal mündlich beantragen, mit mindestens 15 Tagen Bedenkzeit dazwischen, sowie schriftlich, unterzeichnet in Gegenwart eines Zeugen. Der ausstellende Arzt ist verpflichtet, über alle verfügbaren Alternativen zu informieren: wie eine palliativmedizinische Behandlung, die Beschwerden lindert, oder eine Betreuung im Hospiz. Kein Arzt ist aber verpflichtet, einem Patienten eine tödliche Dosis eines Barbiturats zu verschreiben.

In den acht Jahren bis Ende 2005 haben alles in allem 246 Menschen mit Hilfe dieser Regelung ihrem Leben ein Ende gesetzt. Das sind jedes Jahr etwa 30 Patienten (siehe Diagramm S. 120). Damit entfällt bemerkenswerterweise nur rund einer von 1000 Todesfällen in Oregon auf das Sterbehilfegesetz. Noch weit interessanter ist vielleicht dies: Mehr als ein Drittel aller Personen, die sich ein Rezept hatten ausstellen lassen, nutzten das Medikament letztlich gar nicht. Offenbar haben sie es sich einfach »unter das Kopfkissen gelegt« und sich mit dem Wissen begnügt, einem als unwürdig empfundenen Tod jederzeit entfliehen zu können.

Vor dem In-Kraft-Treten des neuen Gesetzes gab es viele Spekulationen über die möglichen Auswirkungen. Gegner hatten beispielsweise prophezeit, dass wohl in erster Linie eher ungebildete, unversicherte und einkommensschwache Patienten vom ärztlich-assistierten Suizid Gebrauch machen würden. Nach acht Jahren ausgezeichnet dokumentierter Praxis lassen sich die meisten der damaligen Vorhersagen nun gut überprüfen.

So ist heute etwa belegbar, dass es keineswegs die sozial Schwachen sind, die das neue Gesetz nutzen. Ganz im Gegenteil: Bei der überwiegenden Mehrheit handelt es sich um gut versicherte und gut ausgebildete Patienten. Von den 246 Menschen, die sich in den acht Jahren mit ärztlicher Hilfe selbst getötet haben, waren 36 Prozent gesetzlich und 63 ▷

In Würde zu sterben bedeutet für die allermeisten Menschen, selbstbestimmt zu sterben. Im US-Bundesstaat Oregon können sich Patienten seit Ende 1997 ein Medikament in tödlicher Dosis verschreiben lassen, wenn strenge Kriterien erfüllt sind.

▷ Prozent privat krankenversichert. Ähnlich verhält es sich mit dem Bildungsstand. Nur 9 Prozent hatten keinen High-School-Abschluss, 29 Prozent besaßen einen; 21 Prozent waren auf dem College gewesen und 41 Prozent hatten sogar einen akademischen Titel erworben. Bezogen auf aufgeschlüsselte Vergleichsgruppen von Sterbefällen in Oregon ist die Rate für ärztlich-assistierten Suizid unter Akademikern rund achtmal so hoch wie bei Personen ohne High-School-Abschluss.

Hat das Gesetz dazu geführt, dass sich sterbende Menschen zunehmend als »sozialen Ballast« empfinden? Nein! Die meistgenannten Gründe für eine Inanspruchnahme sind: Verlust der Autonomie (86 Prozent), Verlust der Würde (83 Prozent) und Verlust der Fähigkeit, Dinge tun zu können, die das Leben lebenswert machen (85 Prozent). Die Sorge, eine Last für andere – insbesondere für Familie und Freunde – zu sein, tritt mit 37 Prozent deutlich dahinter zurück, zumal wenn man bedenkt, dass dies kaum jemals der einzige oder gar ausschlaggebende Grund für den Todeswunsch darstellt.

Palliativmediziner sagen gern: »Wer keine Schmerzen hat, will nicht sterben.« Wie die Erfahrung aus Oregon zeigt, könnte nichts weiter von der Wahrheit entfernt sein. Mit 22 Prozent rangieren »nicht kontrollierbare Schmerzen oder die Angst davor« an vorletzter Stelle der sieben aufgelisteten Gründe. (Dahinter folgen »befürchtete finanzielle Belastungen« mit 3 Prozent.) Weit stärker als die Angst vor nicht zu lindernden Schmerzen ist offenbar der Wunsch, nach seinen eigenen Vorstellungen sterben zu dürfen. Wie Patrick C. Robertson wollen die Patienten vor allem Kontrolle über ihr Sterben haben und die Zeit und den Ort ihres Todes selbst bestimmen. Vermutlich dürfte ihnen der New Yorker Rechtsphilosoph Ronald Dworkin aus dem Herzen gesprochen haben, als er schrieb: »Nichts ist demütigender, als von anderen vorgeschrieben zu bekommen, wie man zu sterben habe.«

Noch deutlicher wird dies, wenn man einmal genauer untersucht, wer diese Menschen eigentlich sind, die sich ein Rezept für ein tödliches Medikament aushändigen lassen. Gibt es irgendwelche gemeinsamen Eigenschaften? Wie bereits erwähnt, ist die überwiegende Mehrheit von ihnen gebildet. Es verwundert daher nicht weiter, wenn Ärzte sie als redegewandt und dabei geradeheraus beschreiben. Andere Attribute lauten beeindruckend, interessant oder leidenschaftlich, aber auch hartnäckig, eigensinnig oder fordernd.

Kontrolle über das eigene Sterben

Was diese Patienten jedoch vor allem miteinander teilen, ist ihr ausgesprochenes Bedürfnis, Herr der Lage zu sein. Nichts scheinen sie so sehr zu fürchten, wie durch geistigen Verfall oder Schmerzen auf andere angewiesen zu sein und die Kontrolle über ihre Körperfunktionen, insbesondere Blase oder Darm, zu verlieren. Typische Bemerkungen über diese Patienten lauten: »Er wollte Kontrolle über sein Sterben haben. Er sagte: Ich will nicht in Tränen aufgelöst, von Schmerzen gezeichnet und mit zugeschissener Hose abtreten. Ich will diese Welt mit Anstand und Würde verlassen.« Eine Frau, die auf Grund ihrer Erkrankung ein unwürdiges Sterben befürchten musste, wird von ihrem Arzt folgendermaßen zitiert: »Ich will nach meinen eigenen Vorstellungen und nach meinen eigenen Vorgaben sterben. Ich will die Zeit und den Ort bestimmen können. Ich will meine Freunde um mich haben. Und ich will nicht vor meinen eigenen Augen verrotten.« Wie Ärzte berichten, betrachteten diese Patienten die Vorstellung, Freunde und Verwandte müssten sie versorgen, mit Horror, und zwar selbst dann, wenn diese glaubhaft versicherten, sie täten es gerne.

Das Bedürfnis, Herr der Lage zu sein, spiegelt sich auch in der Art und Weise wider, in der solche Menschen nach einem Rezept verlangen. Sie werden von den Ärzten als entschlossen, kompromisslos und unnachgiebig beschrieben. Ein Mediziner meinte: »Sie sind nicht die Art von Patient, die ins Sprechzimmer kommt und fragt: Was soll ich tun? Vielmehr sagen sie: Lassen Sie mich Folgendes klarstellen. Ich brauche keinen Doktor, der mir wohlgemeinte Ratschläge gibt, sondern einen, der mir ein Rezept ausstellt.« Einer der Patienten, der sich offenbar des Unterschieds zwischen ärztlich-assistiertem Suizid und aktiver Euthanasie nicht bewusst war, ging so weit zu sagen: »Ich will, dass Sie mir eine Spritze setzen, ... nun ja, ... nach der nächsten Jagdzeit.« Er wollte offenbar noch eine letzte Saison der Hirschjagd erleben.

Wie gehen Ärzte mit der Bitte um Beihilfe zur Selbsttötung um? Die allermeisten be-

Formen der Sterbehilfe

- Bei der **passiven Sterbehilfe** darf ein unheilbar erkrankter Patient seinen Arzt darum bitten, auf lebensverlängernde medizinische Maßnahmen zu verzichten oder sie abzubrechen.
- Bei der **aktiven Sterbehilfe** darf ein unheilbar erkrankter Patient seinen Arzt darum bitten, ihm ein Medikament zu spritzen, das ihn tötet.
- Beim **ärztlich-assistierten Suizid** darf ein unheilbar erkrankter Patient seinen Arzt darum bitten, ihm ein Medikament zu verschreiben, mit dem er sich selbst töten kann.

trachten es als eine Ultima Ratio, ein Mittel, zu dem man erst greift, wenn alles andere versagt hat. Andere Mediziner sehen darin ein Recht des Patienten. Einer dieser Ärzte meinte: »Ich bin der festen Überzeugung, dass der Entschluss zur Selbsttötung – ähnlich wie der zu einer Scheidung oder einer Abtreibung – ein schmerzlicher ist. Sofern jemand diese Entscheidung nach langer und reiflicher Überlegung trifft, habe ich keine Wahl, als sie zu akzeptieren, denn letztlich ist es sein Leben.« Trotz der verständnisvollen Haltung vieler Mediziner wollen jedoch nur wenige persönlich in eine Beihilfe zur Selbsttötung verwickelt werden. Einige fürchten um ihre Reputation: »Ich will nicht, dass man mich hinter vorgehaltener Hand ›Dr. Tod‹ nennt.« Andere fühlen ihre Kompetenz in Frage gestellt: »Ich komme nicht umhin, mich wie ein Verlierer zu fühlen, wenn ein Patient nach allem, was ich für ihn getan habe, plötzlich um ein Rezept bittet.« In den allermeisten Fällen überwiegt jedoch das Gefühl der Pflicht, einen Patienten nicht im Stich lassen zu dürfen: »Ich würde mich schrecklich fühlen, wenn ich einen Patienten, dessen Lage wirklich aussichtslos ist, einfach abwiese.«

Eine Entwicklung war zunächst völlig unerwartet, erscheint aber im Nachhinein nur folgerichtig: Die Legalisierung des ärztlich-assistierten Suizids hat die palliative Versorgung in Oregon nicht etwa verschlechtert, sondern eindeutig verbessert. Sowohl Befürworter als auch Gegner des neuen Gesetzes sind sich darin einig, dass es die Notwendigkeit einer optimalen Versorgung sterbender Patienten stärker bewusst gemacht hat. Bei einer Umfrage im Jahr 2001 antworteten zwei Drittel aller Ärzte, die mit Todkranken zu tun haben, dass sie sich seit In-Kraft-Treten genauer als je zuvor über alle verfügbaren Möglichkeiten der Schmerzbekämpfung informieren. Von den 246 Patienten, die ihrem Leben ein Ende setzten, hatten denn auch 213 die Betreuung durch ein regionales Hospiz genutzt.

Traten im Verlauf der Selbsttötungen irgendwelche Komplikationen auf? Von den 246 Patienten hatten 229 keinerlei Schwierigkeiten mit der Einnahme des Barbiturats, zu fünf liegen keine Auskünfte vor. Zwölf erbrachen ein Drittel oder gar die Hälfte des Medikaments. Bei allen trat die erwünschte Bewusstlosigkeit nach spätestens 38 Minuten ein, in der Hälfte der Fälle bereits binnen 5 Minuten. Die Hälfte der Personen starb innerhalb von 25 Minuten nach der Einnahme. Einige wenige Patienten sollen noch bis zu 9,5 Stunden, einer für 31 und ein weiterer sogar für 48 Stunden, am Leben gewesen sein, ohne jedoch aus ihrer Bewusstlosigkeit zu erwachen. Nie kam es zu Krämpfen und nie musste ein Notarzt gerufen werden.

	passive Sterbehilfe	ärztlich-assistierter Suizid	aktive Sterbehilfe
US-Bundesstaat Oregon	✓	✓	○
Belgien	✓	✓	✓
Schweiz	✓	✓	○
Niederlande	✓	✓	✓
Deutschland	✓	○	○

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: E. DAHL

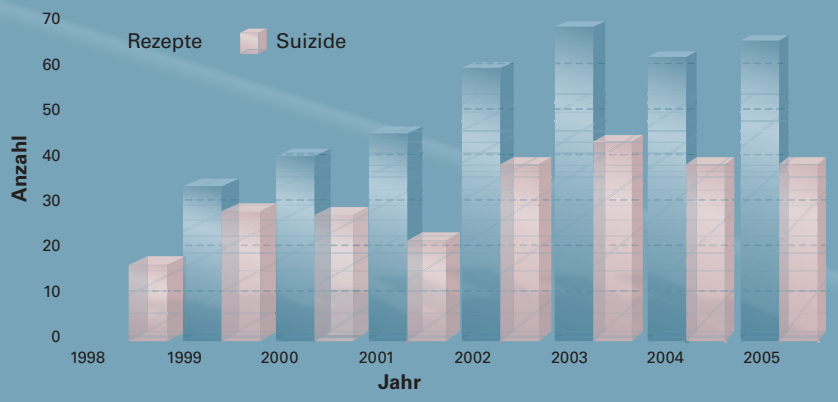
Die einzelnen Länder unterscheiden sich in dem, was von ärztlicher Seite an prinzipiellen Formen der Sterbehilfe zulässig ist, aber auch in den Details. Oregon hat bei seinem »Death with Dignity Act« zahlreiche Sicherheitsvorkehrungen getroffen, um vor Missbrauch zu schützen.

Anfang letzten Jahres ereignete sich jedoch ein Fall, der eindeutig als Komplikation bewertet werden muss. Nachdem der 42-jährige David E. Prueitt am 30. Januar 2005 die verschriebenen 10 Gramm Secobarbital, mit Apfelsaft und Zimt vermischt, geschluckt hatte, erwachte er nach dreitägiger Bewusstlosigkeit am 2. Februar 2005 plötzlich wieder. Laut seiner Frau waren seine ersten Worte: »Was zum Teufel ist passiert? Warum bin ich nicht tot?« Prueitt verstarb 14 Tage später an den Folgen seines Lungenkrebses, zählt daher statistisch nicht zu den 246 Selbsttötungen. Der Wissenschaftliche Beirat der Pharmakologischen Gesellschaft von Oregon beschäftigt sich nach wie vor mit diesem Zwischenfall, der einen gesonderten Eintrag erhielt. Es könnte sein, dass die etwas eigenwillige Mixtur die Wirkung des Schlafmittels aufgehoben hat.

Was ist mit Missbrauch?

Die zweifellos wichtigste Frage lautet freilich: Ist das Gesetz jemals nachweislich missbraucht worden? Tatsächlich gibt es zwei Todesfälle, bei denen zumindest die Gegner dies behaupten. Beide Male handelte es sich um Patienten, die möglicherweise unter einer klinischen Depression litten und demzufolge kein Rezept hätten erhalten dürfen. In einem dieser Fälle ging es um eine 80-jährige Frau mit Brustkrebs, die ein Internist für depressiv, ein Psychiater aber für urteilsfähig erklärt hatte. Vier weitere Ärzte, die ebenfalls mit der Betreuung dieser Patientin betraut waren, stimmten mit dem Psychiater überein. Dennoch halten Gegner der neuen Gesetzgebung bis heute daran fest, man habe die Diagnose des Internisten wissentlich und willentlich ignoriert.

Der zweite Fall betraf eine 85-jährige Frau mit inoperablem Magenkrebs. Als ihr behandelnder Arzt das Ausstellen eines Rezepts ablehnte, konsultierte sie einen anderen – und ▷


Rezepte
Suizide
Anzahl
70
60
50
40
30
20
10
0
1998
1999
2000
2001
2002
2003
2004
2005
Jahr

JULIA GREEN

Supervulkane

Sie liegen versteckt im Untergrund, sind bis zu tausendfach so groß wie der Ätna und brechen nur alle 100 000 Jahre aus. Dann aber entfalten sie eine Vernichtungskraft wie der Einschlag eines kleinen Asteroiden

WEITERE THEMEN IM AUGUST

Schwerlast auf dem Acker

Die heute üblichen schweren Landgeräte verdichten die Ackerböden zu stark. Das senkt die Ernteerträge und erhöht die Hochwassergefahr

CORBIS, ROGER RESSMEYER

Wie gefährlich sind Nuklearterroristen?

In vielen zivilen Forschungsreaktoren lagert hoch angereichertes Uran. Trotz erhöhter Sicherheitvorkehrungen bleiben gefährliche Lücken, die Terroristen nutzen könnten

GINA GORNY / GEHIRN&GEIST

Hilfe bei Parkinson

Wie lässt sich der Untergang von Nervenzellen bei der Schüttellähmung aufhalten? Neue therapeutische Ansätze zeichnen sich ab

Die Riesenteleskope der nächsten Generation

Mit neuartigen Observatorien wollen Astronomen das Licht erdähnlicher Planeten und fernster Galaxien einsammeln

SLIM FILMS; NACH: ESO